2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2212-2231

地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn

ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

高兆丰,姜志海,李毛飞,等.2026.TBM 隧道超前探测技术研究进展与展望.地球物理学进展,41(5):2212-2231,doi:10.6038/pg2026JJ0430.

GAO ZhaoFeng,JIANG ZhiHai,LI MaoFei, *et al*. 2026. Review of advance detection in TBM tunneling: research progress and outlook. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2212-2231,doi:10.6038/pg2026JJ0430.

TBM 隧道超前探测技术研究进展与展望

Review of advance detection in TBM tunneling: research progress and outlook

高兆丰,姜志海*,李毛飞,朱姣,胡双贵

GAO ZhaoFeng,JIANG ZhiHai*,LI MaoFei,ZHU Jiao,HU ShuangGui

中国矿业大学资源与地球科学学院,江苏徐州 221000

School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221000, *China*

摘 要 隧道施工过程中,必须采用地球物理超前探测技术查明隐蔽地质致灾因素,提前采取防控措施.近年来,为适应全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)快速、连续掘进的发展趋势,地球物理超前探测技术取得了显著进展,主要体现在(1)探地雷达和地震波法已基本实现了随掘动态监测,前者通过刀盘搭载实现圆周扫描,后者利用破岩振动为震源;(2)电法类超前探测通过观测系统优化与 TBM 集成,有效缓解了施工空间受限与强电磁干扰的问题,大幅缩短了停机探测的时间.然而,当前研究仍面临诸多挑战,例如单一地球物理方法超前探测距离与分辨率的矛盾依旧突出;强噪声环境下的信号有效提取仍是制约探测精度的关键;此外,实现多源数据智能解译及实时决策系统的构建亦需重点突破.因此,论文系统梳理了针对不良地质体和突水灾害源的超前探测方法,分析并总结各方法观测系统的技术特点与局限性,对综合超前探测系统集成与智能化探测进行了展望,旨在为掘探一体化技术体系的发展提供参考.

关键词 盾构隧道;超前探测;掘探一体化;电法勘探;地震波勘探

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0430

CSTR:32085.14.pg2026JJ0430

Abstract During tunnel construction, geophysical advanced detection technologies are essential for identifying hidden geological hazards and implementing timely preventive measures. In recent years, significant progress has been made in adapting these technologies to rapid and continuous tunnel boring machine (TBM) excavation. The advances are mainly demonstrated in two aspects: (1) Ground Penetrating Radar (GPR) and seismic exploration have essentially achieved real-time dynamic monitoring during excavation. The former accomplishes circumferential scanning through cutterhead integration, while the latter utilizes rock-breaking vibrations as a seismic source. (2) For electrical exploration, the optimization of observation systems and integration with TBM have effectively mitigated the limitations posed by confined construction spaces and strong electromagnetic interference, significantly reducing the downtime required for detection. However, the current research still faces many challenges. For instance, the contradiction between the advanced detection range and resolution of a single geophysical method remains prominent. The effective extraction of signals in a strong noise environment remains a key factor restricting the detection accuracy. Moreover, the construction of an intelligent interpretation and real-time decision-making system for multi-source data also requires key breakthroughs. Therefore, this paper systematically reviews advanced detection methods for adverse geological structures and water-inrush hazards, analyzing and summarizing the technical characteristics and limitations of various observation systems. It provides an outlook on the integration and intelligent detection of the comprehensive advanced detection system. The aim is to provide a reference for the development of the integrated exploration and excavation technology system.

Keywords TBM tunnel; Advance detection; Integrated tunneling and exploring; Electrical exploration; Seismic exploration

收稿日期 2025-12-16; **修回日期** 2026-06-05. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金面上项目(42574200)资助.

第一作者简介 高兆丰,男,2000 年生,博士研究生,主要从事矿井地球物理勘探理论研究.E-mail:15951572480@163.com

*通讯作者 姜志海,男,1978 年生,教授,博士生导师,主要从事矿井地球物理勘探理论与应用技术研究.E-mail:jzh3885434@126.com

0 引　言

自 20 世纪中叶引进全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)工法以来,我国地下工程、水利及交通隧道建设取得了跨越式发展(何川等,2015;洪开荣,2017).21 世纪起,国家战略推动 TBM 自主研发进程,极大提高了我国 TBM 的国产率和应用规模,使其逐渐成为深长隧道施工的核心手段(齐梦学,2021;洪开荣等,2022).巩江峰等(2025)统计了截至 2024 年底我国在建及规划隧道数量,如表 1 所示,可知我国长度 10 km 以上的隧道数量逐渐增多(刘继国等,2024).同时,凭借其安全、高效的技术优势,TBM 工法逐渐被煤矿巷道掘进所接受.严红等(2025)统计了近十年煤矿 TBM 掘进新增数量变化,如图 1 所示,表明 TBM 工法已成为大型矿井智能化建设与生产的优选方法和必然发展趋势(王杜娟等,2020;张洪伟等,2021;范京道等,2022).

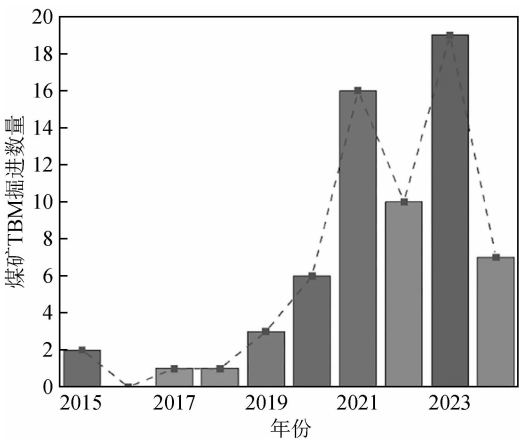


图 1　近 10 年煤矿 TBM 掘进新增数量变化(严红等,2025)

Fig. 1　Change in the newly added number of coal mine TBM drivage in the past decade (Yan *et al*., 2025)

然而,TBM 工法存在施工灵活性欠佳、地质适应能力较弱的缺点,掘进过程中一旦遭遇未探明的地质异常体,极易诱发突水涌泥、塌方等灾害(Qian and Lin,2016;李术才等,2018a),表 2 所列的历史事故案例凸显了超前探测在隧道施工中的重要性.尽管 TBM 通常配备快速超前地质钻机,但其钻探范围受机械结构制约,因此需结合地球物理技术实现对隐伏致灾因素的精准探测(刘斌等,2016).TBM 隧道结构复杂且特殊,如图 2 所示,TBM 后部设备密集,几乎占据了隧道的所有空间,致使适用于钻爆法隧道的传统地球物理超前探测技术无足够的施工空间进行观测系统的布设;同时 TBM 本身属于大型金属,其刀盘及电气动力系统严重影响电法类超前探测数据的信噪比和探测精度;此外,TBM 隧道工程要求进行探测工作时兼顾掘进效率(付伟等,2023;钱七虎等,2024).因此,实现 TBM 隧道超前探测需突破以下三方面挑战(李术才等,2014):(1)在 TBM 占用隧道空间的条件下实现观测系统的有效布设;(2)抑制刀盘及强大电气动力系统带来的电磁干扰;(3)保障 TBM 快速掘进与超前探测作业工序正常衔接.笔者系统梳理了近年来隧道超前探测技术的研究进展,重点聚焦不良地质体和突水灾害源的两类探测目标,分析不同探测方法在 TBM 隧道中的适用性,旨在为相关领域研究提供参考.

表 1　截至 2024 年底中国铁路隧道在建及规划数量(巩江峰等,2025)

Table 1　Number of railway tunnels under construction and planned in China as of the end of 2024 (Gong *et al*., 2025)

	高速隧道		铁路隧道		特长隧道	
	总数量/座	总长度/km	总数量/座	总长度/km	总数量/座	总长度/km
2024 年新增情况	356	544	424	738	10	138
在建情况	58	9866	2521	6905	163	2504
规划情况	2057	4843	5634	13742	259	3633

表 2　我国隧道建设过程中遭遇的部分地质灾害(钱七虎,2012;胡佳豪,2020)

Table 2　Geohazards encountered during tunnel construction in China (Qian, 2012; Hu, 2020)

隧道名称	地质灾害描述
大瑶山铁路隧道	施工期涌水量 4000 ~ 15000 m^3/d
宜万马鹿箐隧道	瞬间突泥 8 万 m^3,最大涌水量 72 万 m^3/h
南广铁路白云隧道	瞬间突泥 2000 m^3,最大涌水量 300 m^3/h,地表塌陷 300 m^2
兰渝铁路古子山隧道	在 3 min 内突水涌泥达 6000 余 m^3,涌泥长度达 78 m,造成机械设备被涌泥掩埋
秦岭终南山特长公路隧道	岩爆段长度达 2664 m
锦屏二级水电站引水隧洞	发生岩爆次数超 750 次,包含数次极强岩爆

1 不良地质体超前探测技术

1.1 探地雷达法

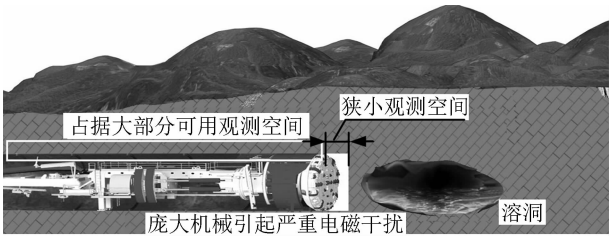


图 2 TBM 隧道超前探测的复杂环境(李术才等,2014)

Fig. 2 Complex environment for advanced detection in TBM tunnels (Li *et al*., 2014)

1.1.1 传统探地雷达超前探测

探地雷达(Ground Penetrating Radar,GPR)是一种基于高频电磁波探测介质分布的地球物理方法,通过发射天线定向发射高频宽频带电磁波,并由接收天线接收反射波,根据反射波的走时、振幅和相位特征识别目标体.传统探地雷达一般在水平平面上沿二维测线进行测量,如图 3 所示,凭借其快速响应与高分辨率的技术优势,广泛应用于掘进隧道前方数米范围内的连续探测(周奇才等,2009;李红军等,2011;梁庆华等,2014;崔凡等,2019).温世儒(2015)从电磁能量、回波频率等对应的颜色特征向量出发,对探地雷达原始剖面的图像特征进行提取分析,建立了基于图像信号特征的地质雷达解释判读标准.在地质状况复杂区域的雷达探测结果中同相轴交错叠加,仅凭雷达剖面图难以准确识别不良地质体的真实形态,张崇民等(2019)针对此问题引入全波形反演方法,适用于介质介电常数差距较小的地质条件,提高了解释精度.然而,传统探地雷达难以探测到隧洞外的异常体,探测效果受隧洞孔径影响,并且由于掌子面往往凹凸不平,耦合不良也会对探测结果造成一定影响.

实际作业中常用多频天线组合方式,先采用 50 MHz 天线进行 50 m 的远距离探测,在发现不良地质体后再采用 100 MHz 天线进行 10~20 m 范围内的精细探测,分辨率在 0.5 m(曾昭发等,2006;李冬等,2018).针对探地雷达超前探测距离与分辨率难以兼顾的技术瓶颈,国内外学者提出了如图 4a 中探地雷达与定向钻孔技术相融合的技术思想,发射天线和接收天线置于同一个钻孔中并以固定间距同步移动,一般间距为 0.5~1 m,可获取钻孔周围 360°范围内异常体的分布情况.由于一般采用全向偶极子天线,因多解性难以确定异常体相对于钻孔的方位角(王路等,2017;钱志远,2023).针对钻孔雷达方位识别能力不足的问题,垂直雷达剖面(Vertical Radar Profile,VRP)被提出,其将发射天线固定在掌子面上的不同位置,仅将接收天线置于钻孔中前后移动(或反之),如图 4b 所示,通过层析成像实现不良地质体的方位定位,但其探测范围呈“三角形”,且探测效果仍受天线耦合影响,因此应用较少.李尧(2017)进一步研究了跨孔雷达在隧道超前探测中的应用可行性,将发射天线和接收天线置于不同的钻孔中,如图 4c、d 所示,通过覆盖整个钻孔的系统扫描与层析成像实现不良地质体的高精度三维定位.此类方法通过优化观测系统逐步提高了探地雷达在复杂地质条件下的探测范围和空间定位能力,极大拓展了探地雷达的适用场景,这些发展推进了与 TBM 超前钻机的协同作业,为构建“钻-探-掘”一体化智能掘进系统提供重要技术方向(范涛等,2026).

1.1.2 随掘圆周扫描超前探测

针对探地雷达测线扫描方式操作繁琐、耗时的

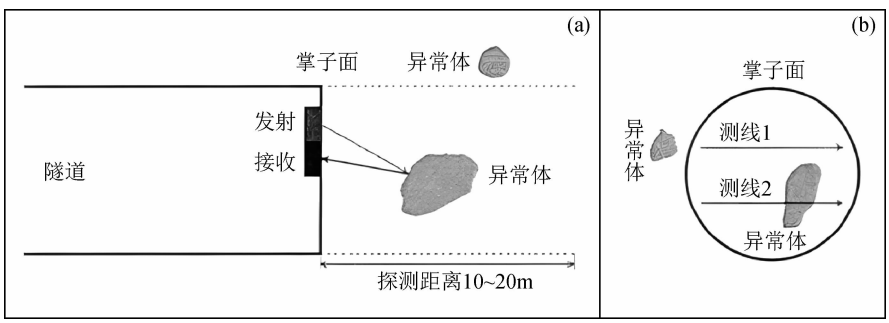


图 3 探地雷达沿二维测线探测(李尧,2017)

(a)装置示意图;(b)测线横截面.

Fig. 3 GPR survey along a 2D survey line (Li, 2017)

(a) Schematic diagram of the configuration; (b) Cross-section of the survey line.

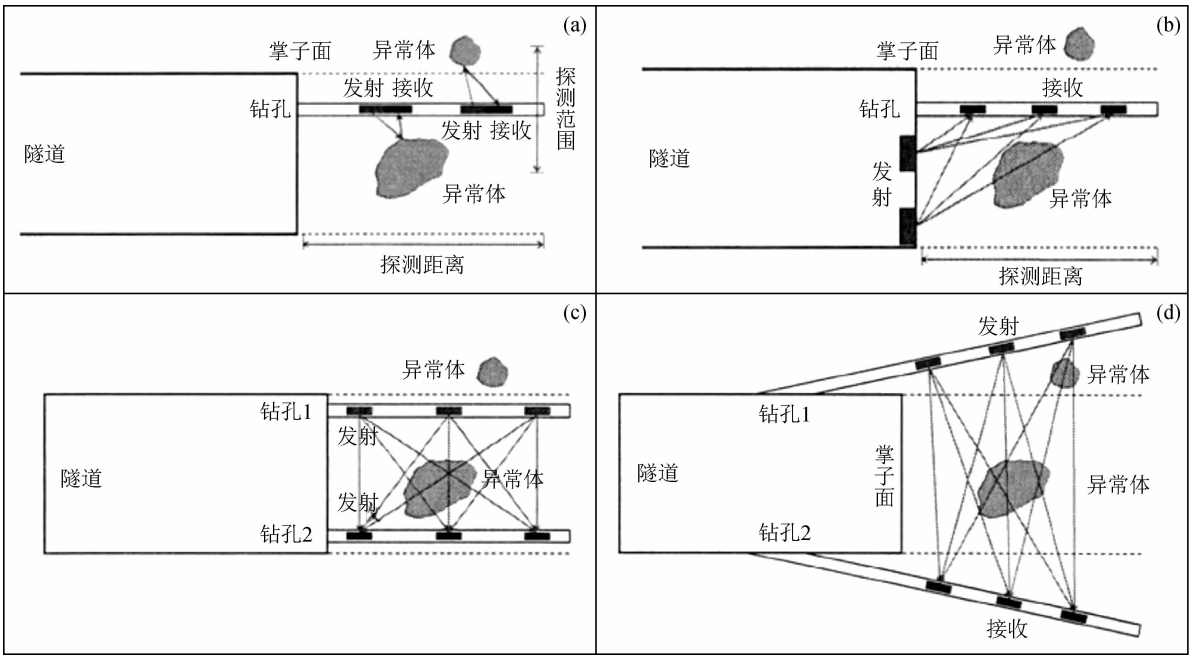


图 4　钻孔雷达超前探测(李尧,2017)

(a)单孔雷达探测方式;(b)VRP 探测方式;(c)水平跨孔雷达探测方式;(d)倾斜钻孔探测方式.

Fig. 4　Borehole radar for advanced detection (Li, 2017)

(a) Single-hole radar detection method; (b) VRP detection method;

(c) Horizontal cross-hole radar detection method; (d) Inclined borehole detection method.

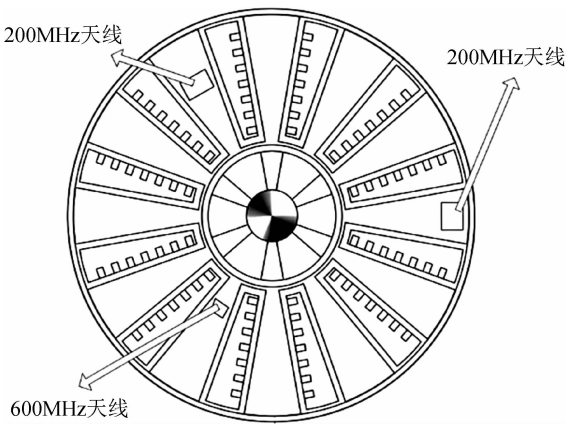


图 5　GPR 天线阵技术示意图(叶琛,2006)

Fig. 5　Schematic diagram of a GPR antenna array(Ye, 2006)

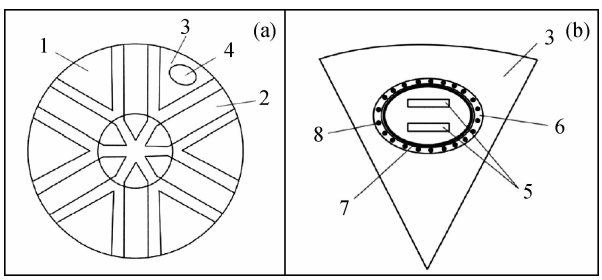


图 6　盾构刀盘一体化探地雷达天线装置

(同济大学和浙江数智交院科技股份有限公司,2025)

(a)探地雷达安装位置示意图;(b)半椭圆形保护腔示意图.

Fig. 6　Configuration of the integrated GPR antenna on a shield cutter head(Tongji University, Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., 2025)

(a) Schematic diagram of the GPR installation location;

(b) Schematic diagram of the semi-elliptical protective housing.

难题,实现探地雷达探测与 TBM 掘进的高效协同成为了重要发展方向. 张安学等(2002)借鉴合成口径雷达技术思想,首次提出将雷达天线沿圆周进行扫描,引入共焦成像技术、角相关和数据融合理论对地下目标体进行三维成像. 在此基础上,周奇才等(2006,2007)率先将其引入 TBM 隧道超前探测中,提出将探地雷达搭载于 TBM 刀盘,随刀盘旋转实现对隧道前方的圆周扫描探测,并通过物理模拟实验验证了该方法的可行性. 为提高探测效率和数据维度,叶琛(2006)提出了在大直径 TBM 刀盘上合理布置多个雷达天线构成天线阵列,如图 5 所示,既可以自发自收,也可以分别进行发射、接收,单次扫描可生成 6 张雷达图,以多阈值探测来解决多解性问题. 李炳杰(2009)推导了探地雷达频率与分辨率的理

论关系,并将 *F-K* 偏移技术应用于雷达圆周扫描图像的特征识别,进一步提升了对不良地质体的探测精度.针对探地雷达圆周扫描数据的可靠性和有效性,周奇才等(2010a)系统分析了雷达天线中心频率选择的主要影响因素,总结了采样方式、时窗设置、扫描速率等关键采集参数的基本原则和技巧,为工程选型与应用提供了依据.Cetinkaya 和 Yarovoy(2014)研究了天线阵列圆周扫描的聚焦特性,优化了圆周扫描模式下的波束形成与信号合成方法.Duan 等(2024)分析了圆周扫描半径对雷达反射波特征的影响,证实了不良地质体的异常波峰响应不会受扫描半径影响.针对工程实用性,周奇才等(2010b)设计了基于聚甲醛材料的雷达天线保护装置,通过在刀盘上开挖形状大小相匹配的矩形孔洞以固定,但矩形结构存在密封性不足、应力集中等问题,整体可靠性不足.为此,同济大学和浙江数智交院科技股份有限公司(2025)研发了如图 6 所示的新型一体化探地雷达天线装置,在安装面板 3 上开挖半椭圆形凹陷腔 4,提升了装置密封性,选用陶瓷复合材料作为保护板 6,与雷达天线 5 相连确保不影响电磁波的传播,该设计显著降低了雷达天线设计和安装的难度.圆周扫描探测方法的提出,不仅实现了探地雷达与 TBM 的物理集成与同步采集,更通过多维数据的获取与处理,提升了探地雷达超前探测的探测效率与精度,工作参数研究和一体化装置设计推动了圆周扫描超前探测在 TBM 隧道中的工程实用进程,为构建掘探一体化、自动化实时探测系统提供了关键技术支撑.然而,探地雷达在分辨率与探测距离之间存在的固有矛盾在这一方法中未能解决,因此在实际工程应用中还需结合其他方法协同探测,以提高探测距离与准确性.

1.2 地震波法

1.2.1 传统地震超前探测

地震波法(Seismic Prediction)是一种基于地震波传播理论的地球物理方法,通过分析地震波在不良地质体界面产生的反射、折射等信号来预报隧道前方不良地质体的分布情况.其传统形式普遍采用炸药震源,在隧道侧壁的钻孔内布置激发和接收装置,以捕获纵波信号为主.早期应用广泛的为如图 7a 所示的 TSP(Tunnel Seismic Prediction)技术,采用直线类观测系统,震源和检波器沿隧道轴向布设,这种方式缺乏横向偏移距,对速度分析形成制约;图 7b 的 HSP(Horizontal seismic profiling)技术改进了观测系统,将震源和检波器分别布置在隧道两侧,形成了具有横向偏移距的观测系统,更有利于速度分析.这两种方法通过减小炸药用量已在部分 TBM 隧道中成功应用(Sattel *et al*., 1996; Inazaki *et al*., 1999).为进一步优化观测系统,图 7c 的 TST(Tunnel Seismic Tomography)技术和图 7d 的 TRT(True Reflection Tomography)技术相继发展,TST 将直线类观测系统拓展至隧道两侧,TRT 则进一步呈现了全空间三维观测系统,在横向和垂向均能获得不同的偏移距数据,更充分地获取空间分布信息.为减小炸药震源的危险性,这两种方法多改用锤击或电火花等非爆破震源,并结合偏移成像技术进行不良地质体的识别(Otto *et al*.,2002;Zhao *et al*.,2006).然而,上述基于隧道壁激发震源的探测方法存在一定的局限性,其激发的体波和面波的波速差异会对波形特征造成影响,且地震波能量以球面波辐射,主要向震源同侧的隧道空间扩散,导致所包含掌子面前方的有效信息较少.针对基于隧道壁激发的探测方法不利于掌子面前方的地质情况解释,宋翱(2017)、Song 等(2019)提出了如图 8 所示的基于掌子面的三维观测系统,其在掌子面上阵列式布置震源和检波器,激发的地震子波能量达到隧道壁激发的 3~4 倍,探测深度达到隧道壁探测的 2~3 倍,同时蕴含的高频信号频带得以拓宽,提高了探测精度.但此类方法需要足够的施工空间,同时要求隧道中无其他振动源,需要 TBM 停机较长时间进行观测系统的布设和数据采集,这与现阶段 TBM 快速、连续掘进的要求存在根本矛盾.

1.2.2 随掘地震超前探测

针对传统方法需中断施工的弊端,随掘地震超前探测技术应运而生.随掘探测的核心思路是探测系统与 TBM 的深度集成.最初的集成化尝试以 ISIS(Integrated Seismic Imaging System)开始,考虑到震源的稳定性及安全问题,该系统采用液压震源自动、多次激发,在刀盘附近搭载三分量检波器接收信号,通过走时层析成像获取隧道前方的空间分布情况(Lüth *et al*.,2008).ISIS 系统仍然是基于隧道壁激发震源,存在有效信号弱、易被 TBM 强背景噪声淹没的问题.研究指出,地震波场中瑞利面波能量强、衰减慢,是进行地震超前探测更为理想的地震波(蒋婵君,2009;贺新,2014).基于瑞利面波的传播特性,ISP(Integrated Seismic Prediction)创新性地利用了瑞利面波—横波转换原理压制噪声干扰,如图 9 所示.该系统改用 TBM 一体化的气动冲击锤反复锤击岩壁激发震源,所激发的瑞利面波信号沿隧道壁传播

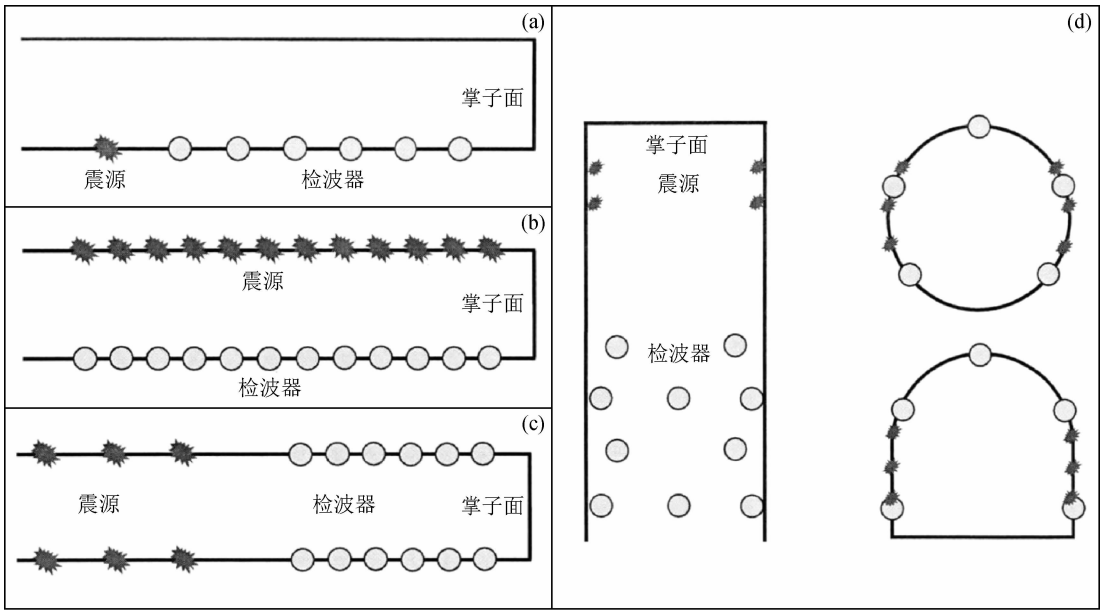


图 7　地震超前探测观测系统(宋杰,2016)

(a)TSP 观测方式;(b)HSP 观测方式;(c)TST 观测方式;(d)TRT 观测方式.

Fig. 7　Observation geometries for seismic advanced detection(Song, 2016)

(a) TSP observation geometry; (b) HSP observation geometry; (c) TST observation geometry; (d) TRT observation geometry.

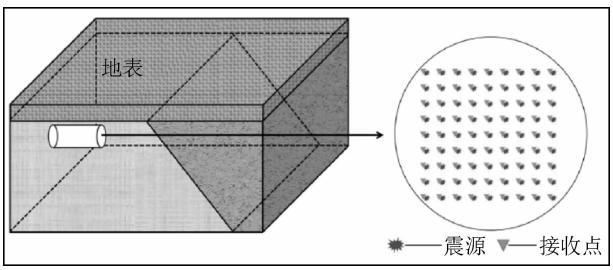


图 8　基于掌子面的三维地震超前探测示意图(宋翱,2020)

Fig. 8　Schematic diagram of 3D seismic advanced detection based on the tunnel face(Song, 2020)

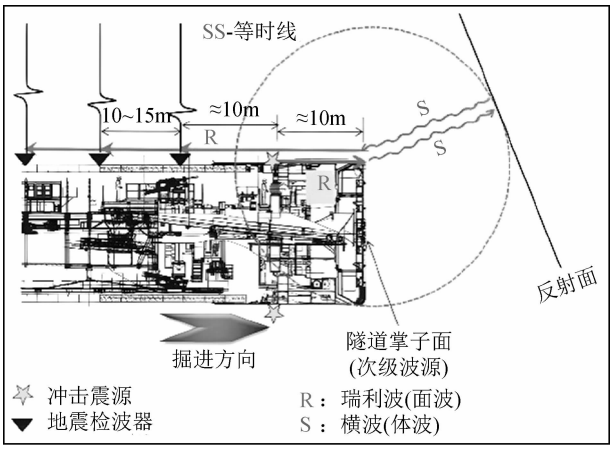


图 9　ISP 工作原理图(朱仲,2017)

Fig. 9　Working principle of ISP(Zhu, 2017)

至掌子面后,转换为横波继续向前方传播,遇到波阻抗差异界面后,一部分能量反射回来再转换为瑞利面波,被安装在后方的多个检波器捕获(Bohlen *et al.*,2003).该理论有效解决了传统地震超前探测反射法有效信号能量弱、方向识别不明显等问题,同时通过隧道两侧的观测对比,分析可提高预测准确度.ISP 系统凭借其高精度偏移成像被我国引入并首次应用于 DXL 公路隧道(朱仲,2017;程德胜等,2019).尽管此类方法同样需要 TBM 停机以确保在安静的隧道环境中记录地震信号,但其极大缩短了停机间隙,提高了随掘地震探测的数据采集效率和成像精度.

掘探一体化突破性的进展源于隧道随掘地震探测(Tunnel Seismic While Drilling,TSWD)概念的提出.借鉴于随钻地震技术(Seismic While Drilling,SWD),Ashida(2001)首次提出利用 TBM 刀盘破岩振动作为震源进行连续探测的技术思想.在此基础上,Petronio 和 Poletto(2002,2006),Petronio 等(2007)系统性地发展了 TSWD 的方法体系.该方法以破岩振动作为天然震源,在刀盘后方记录 TBM 破岩振动情况为先导信号,在隧道内不同位置布置检

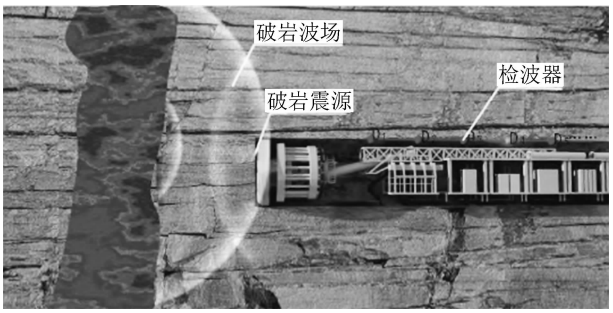


图 10 破岩震源随掘探测示意图(杨玲洁等,2021)

Fig. 10 Schematic diagram of while tunneling detection using rock-breaking seismic sources (Yang *et al*., 2021)

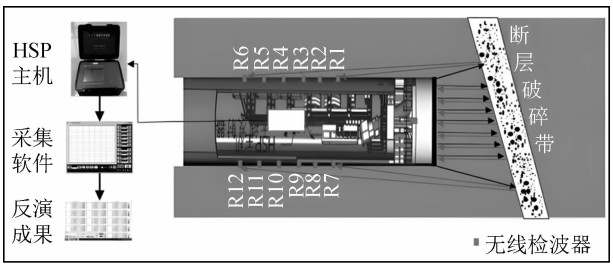


图 11 TBM 施工 HSP 探测示意图(卢松等,2020)

Fig. 11 Schematic diagram of HSP detection in TBM tunneling (Lu *et al*., 2020)

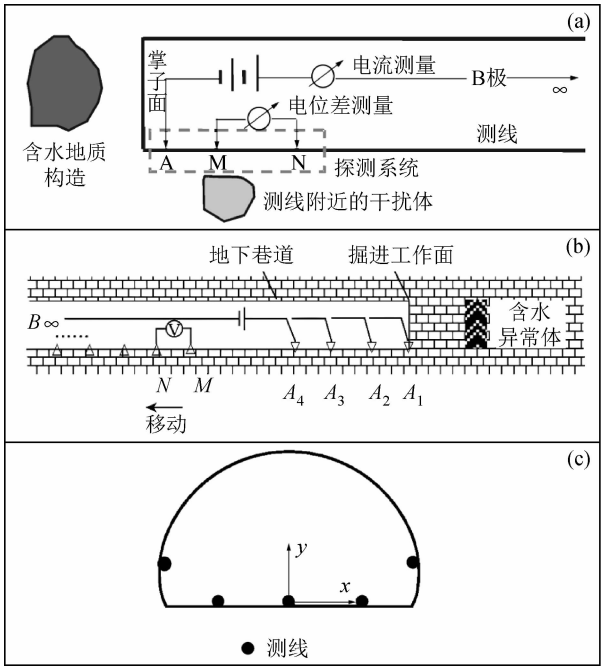


图 12 定点源超前探测示意图

(韩德品等,2010;刘斌等,2012)

(a)三极法;(b)七电极系测量系统;(c)三维全空间立体观测方式.

Fig. 12 Schematic diagram of advanced detection using a fixed-point source (Han *et al*., 2010; Liu *et al*., 2012)

(a) Tri-pole method; (b) Seven-electrode array measurement system; (c) 3D whole-space observation geometry.

波器接收信号,如图 10 所示.通过对多种信号进行互相关处理,可获得用于解释的地震记录,最后借鉴地面随钻地震技术中垂直地震剖面法(Vertical Seismic Profiling,VSP)的数据处理流程,进行滤波、纵横波初至拾取、波场分离与偏移成像等处理,最终获取隧道前方及周围区域的纵横波速度模型和相应的地震剖面.我国学者在该领域亦取得了系列研究成果,山东大学(2015)提出了一种 TBM 破岩震源与主动源相结合的三维地震联合超前探测系统,该系统在 TBM 停机期间采用可控源震源实现远距离地质构造探测,根据探测结果对接下来的 TBM 施工进行优化调整,在掘进过程中利用刀盘破岩振动作为震源,通过三分量检波器记录地震信号、噪声传感器记录噪声源,实现近距离不良地质体的实时探测.中铁西南科学研究院的李苍松等(2008)、卢松等(2017)则提出了一种基于 TBM 刀盘滚刀破岩声波信号的新型 HSP 声波反射法预报方法,通过在 TBM 壳体上搭载空间阵列声波仪系统,同步采集围岩振动回波与 TBM 机身的振动噪声,如图 11 所示,每次采集持续 5 ~ 15 min,对采集到的地震记录进行时域分析获取基准纵波速度用于时深转换,再经频谱分析、相关分析等处理,最后采用能量叠加最大化原理进行反射与散射的联合反演成像,该方法已在西部岩溶隧道以及煤矿掘进巷道等复杂地质条件下均成功应用(赵子越等,2021;刘金刚等,2021;张盛等,2024).现有的 TBM 破岩震源随掘超前探测方法多借鉴现场案例和随钻地震技术,以实践经验为主,许新骥(2017)则从理论层面切入,系统开展了 TBM 破岩震源的地震波场特性与传播机制的正演模拟研究,从多震源点合成连续随机信号的角度,提出了一套适用于 TBM 破岩震源的地震记录重构方法,并基于接收阵列的地震波束定向方法提高了重构地震记录的信噪比,同时借鉴传统地震超前探测方法对破岩震源重构地震记录进行数据处理及偏移成像研究,揭示了典型不良地质体的偏移成像特征,为现场资料的处理解释提供了理论基础,相关成果已在吉林等地成功应用.随掘地震超前探测技术不再将 TBM 刀盘掘进产生的强烈振动视为有害噪声加以规避,而是将其转化为一种可利用的、连续的天然震源,从根本上解决了传统探测只能在 TBM 短暂停机

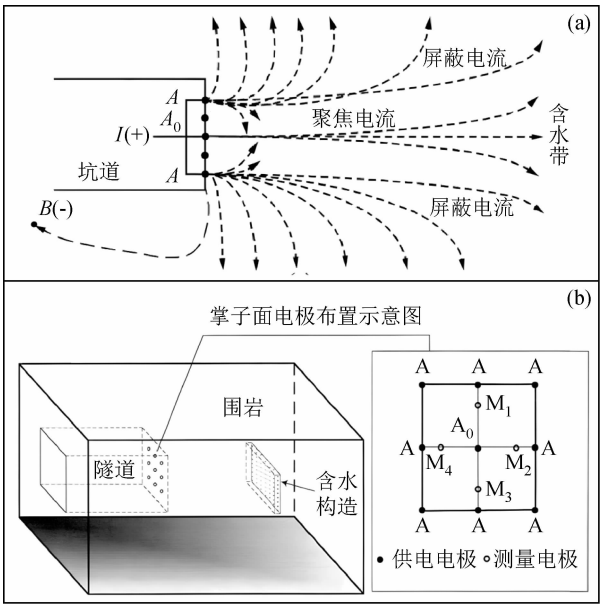


图 13　聚焦电流法超前探测示意图
(柳建新等,2012;邓小康,2013)
(a)电流聚焦示意图;(b)九点式布极法示意图.
Fig. 13　Schematic diagram of advanced detection using the focused current method (Liu *et al.*, 2012; Deng, 2013)
(a) Current focusing schematic;
(b) Schematic of the nine-point electrode layout method.

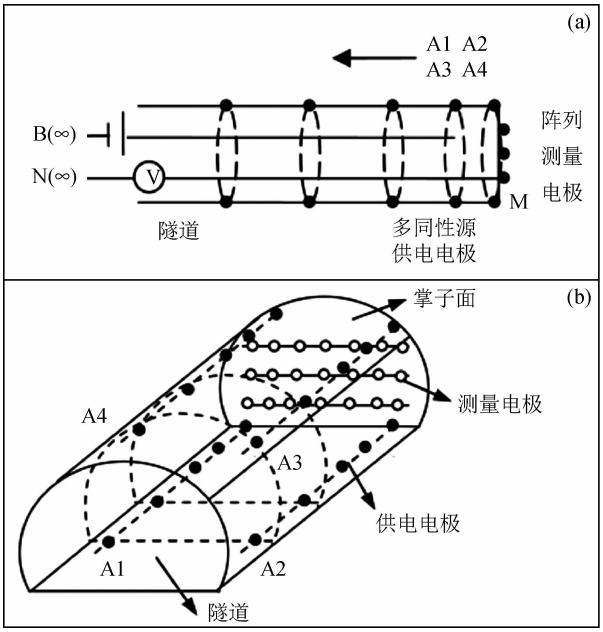


图 14　多同性源电极阵列电阻率超前探测示意图
(李术才等,2015)
(a)观测方式剖面图;(b)观测方式三维示意图.
Fig. 14　Schematic diagram of advanced detection using a multi-homologous source electrode array (Li *et al.*, 2015)
(a) Profile of the observation geometry;
(b) 3D schematic of the observation geometry.

间隙开展的困境,将超前探测完全融入到 TBM 掘进的工序中,提升了超前探测的连续性与时效性,真正实现了 TBM 的掘探一体化.

2　突水灾害源超前探测技术

2.1　直流电阻率法

2.1.1　传统直流电阻率超前探测

直流电阻率法(Direct Current Resistivity Method)是一种基于稳定电流场理论的地球物理方法,通过分析由人工源建立的稳定电场等位面的分布特征来推断前方岩体的电阻率结构. 最早的实践始于李学军(1992)提出的定点源三极法超前探测,由单电极 A 供电,较远位置布置无穷远电极 B,等间隔移动偶极 MN 测量电位差,如图 12a 所示,在煤矿巷道中应用较多并给出了超前探测资料的半定量解释方法. 针对单一的电位曲线解释精度不足的问题,程久龙等(2000)从定点源三极法装置原理出发,提出了几何作图法确定电性异常体的位置. 刘青雯(2001)在三极法的基础上提出了三点三极超前探测方法,即布置三个等间隔供电的电极依次供电,利用三组视电阻率数据相互校正. 黄俊革等(2006,2007)揭示了隧道空腔对电场分布的影响,提出了"探厚比"的概念以指导数据处理解释工作. 刘斌等(2009)聚焦典型含水构造,提出了"等效球体"的概念,并推导了全空间中球体含水构造直流电法超前探测的解析解公式. 韩德品等(2010)进一步采用如图 12b 所示的七电极系测量系统,将多条视电阻率曲线拟合归一,提出了一种均方误差解释标准. 然而单测线的观测系统对测线附近的介质响应更强,往往会掩盖掌子面前方的有效异常信息,且其解释成果多为二维电性剖面,缺乏空间量化地质信息(胡雄武等,2010;强建科等,2011). 针对侧方干扰引起的多解性问题,刘斌等(2012)提出了三维全空间立体观测方式,在隧道空间中布置五条测线,如图 12c 所示,采用线性与非线性结合的混合反演成像方法有效识别并压制了侧方干扰. 胡雄武和张平松(2019)针对陷落柱模型提出了"探半比"的概念,给出了全空间点源超前探测视电阻率计算公式,发现定点源超前探测难以实现异常的远距离探测,同时受方位影响,探测分辨率较低. 针对掌子面前方异常响应较弱的问题,柳建新等(2012)提出了如图 13a 所示的直流聚焦法,指出环状屏蔽电极装置可使供

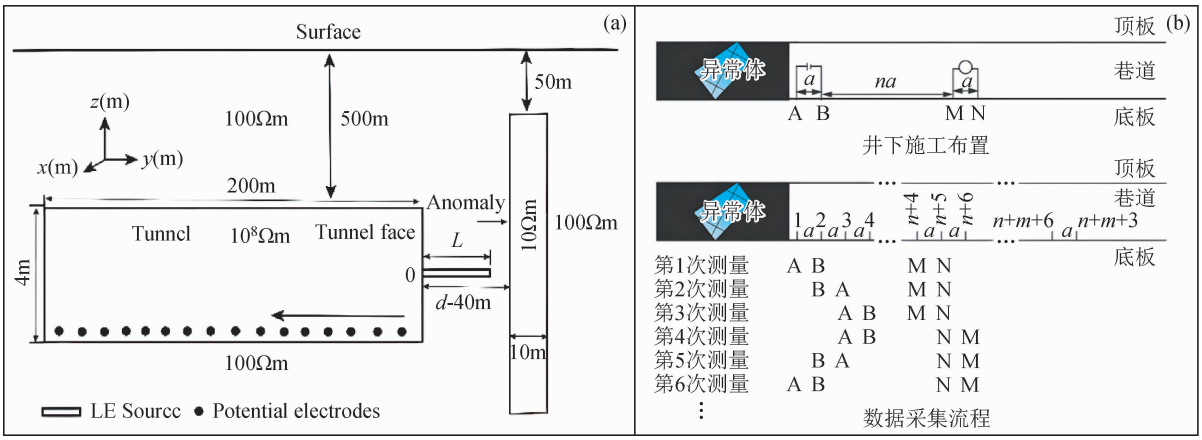


图 15 改进供电方式的超前探测示意图(Hu *et al*., 2022;岳建华等,2025)

(a)长电极源超前探测;(b)偶极—偶极超前探测.

Fig. 15 Schematic diagram of advanced detection with improved power supply methods (Hu *et al*., 2022; Yue *et al*., 2025)

(a) Advanced detection with a long electrode source; (b) Advanced detection using a dipole-dipole array.

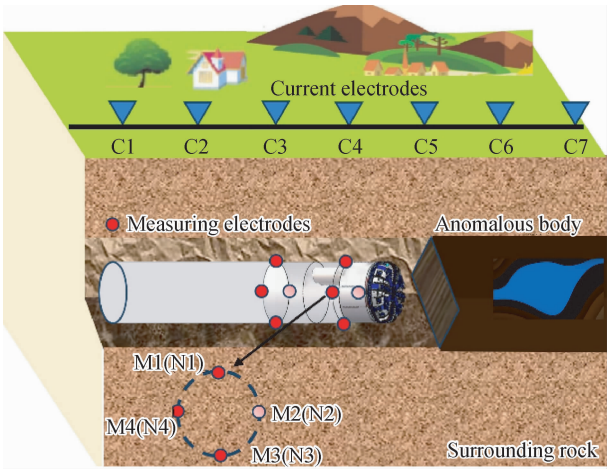


图 16 机载矢量电阻率超前探测示意图(Gao *et al*., 2024)

Fig. 16 Schematic diagram of vector resistivity advanced detection assembled on a TBM (Gao *et al*., 2024)

电电极产生的电流呈放射状向掌子面前方传播得更远,对掌子面前方的异常响应更加灵敏. 邓小康(2013)在这一基础上发展出如图 13b 所示的九点式布极聚焦电流法,在掌子面上,采用网格式测量替代传统式测线. 但聚焦电流法需要连续探测依据趋势判断导致探测距离仍然有限,李术才等(2015)在环状电极的基础上提出了如图 14 所示的多同性源阵列电阻率超前探测,该方法在掌子面上布置三条测线,并在隧道侧壁布置可同步供电且等间距移动的四个阵列供电电极,多同性源的供电方式可有效压制侧方异常体的干扰,而供电电极的后移能逐步提高探测距离,最终采用阵列数据实现 30 m 范围内的三维反演成像. 此外,有学者对源的供电方式进行改进以提高探测范围和分辨率. 胡代明(2022)提出了利用掌子面上先导钻孔作长电极源,如图 15a 所示,显著增强了远距离的信号强度,并结合全空间电阻率各向异性实现了对陡倾断层的识别. 岳建华等(2025)提出了如图 15b 所示的偶极—偶极观测系统,理论模拟和实际应用均表明偶极子源全空间影响范围更广,探测效果优于传统的定点源超前探测. 此类方法面临与传统地震超前探测相同的困境,十分依赖充足的施工时间和空间条件,以满足观测系统的有效布设和数据采集.

2.1.2 随掘电阻率法超前探测

针对传统直流电阻率法在 TBM 隧道中施工受限的问题,笔者提出了一种机载矢量电阻率随掘监测技术(Gao *et al*.,2024),该方法突破了在隧道内布设观测系统的传统思路. 观测系统如图 16 所示,在地面上沿 TBM 掘进方向等间距布置多组供电电极,相邻电极组成偶极并依次供电. 同时在 TBM 上环状搭载八个测量电极,组成五组测量电极对,利用 TBM 停机间隙,基于冲击钻原理将电极固于围岩中采集电位,进而计算各个方向的视电阻率,称为矢量电阻率. 当某一组供电偶极下方存在低阻异常体时,测量电极可观测到异常电位,由供电偶极的位置反推异常体的距离,因此显著增大了超前探测距离. 此外,可根据矢量电阻率的相互对比,对异常体相对于隧道的空间方位进行定性判断. 这一思路巧妙地规避了 TBM 隧道施工空间受限的问题,是直流电阻率超前探测适应 TBM 隧道环境的有益尝试,其技术优

势初步实现了异常方位的定性判断. 一方面,该方法的距离分辨率与供电极距相关,然而直流电阻率法中供电极距又限制了探测深度,二者相互制约;另一方面地面布设电极建立的电流场分布易受地形影响,因此该方法不适用于地形起伏剧烈的山区.

2.2　随掘激发极化法超前探测

激发极化法(Induced Polarization,IP)是一种基于介质激电效应差异的地球物理方法,通过观测人工施加一次电流场后介质产生的二次电位衰减特征来推断前方岩体的激电特性分布. 随掘激发极化法同样是将探测系统与 TBM 实现一体化集成,从而克服施工空间受限的问题,并借助聚焦电流技术增强超前探测能力,该方法对水体十分灵敏,是实现隧道突水灾害源超前探测的重要技术方向. BEAM(Bore-Tunneling Electrical Ahead Monitoring)系统是较早实现工程化的随掘激发极化探测技术,工作方式如图 17a 所示. 该方法基于交流激发极化原理,在护盾上环状搭载电极以发射屏蔽电流,使内部发射的电流向前方聚焦,刀盘上的电极采集极化电位信号,通过分析视电阻率与频率效应百分比(Percentage Frequency Effect,PFE)评估前方一定范围的富水性分布(朱劲等,2007;Kaus and Boening,2008). 然而该系统探测距离仅约 3 倍洞径大小,且仅能提供二维解释成果,对于大倾角地质构造的定位精度难以满足现阶段的施工需要. 为提升探测范围与精度,李术才等(2018b)将多同性源阵列电极的技术思想在 TBM 上实现集成化,提出了随掘三维激发极化法超前探测. 观测系统如图 17b 所示,其利用首圈电极的屏蔽作用,使供电电流拥有更强的向前聚束效果,构成聚焦测深型观测模式,从而将有效探测距离延长至 30 m,且能对径向 30 m 内的突水灾害源进行三维空间定位. 随掘激发极化法为 TBM 隧道对突水灾害源的超前探测提供了关键技术支撑,显著推动了 TBM 掘探一体化实践进程. 然而,由于激发极化信号较弱,该技术在信噪比提高和远距离探测能力方面仍面临挑战.

2.3　瞬变电磁法

2.3.1　传统瞬变电磁超前探测

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method,TEM)是一种基于电磁感应理论的地球物理方法,通过观测一次脉冲场激励下地质体中感应涡流产生的二次场衰减过程来推断前方岩体电性结构. 隧道超前探测一般采用时间域瞬变电磁,为适应隧道的狭小空间,回线源装置应用较多,逐渐发展成了基于掌子面的观测系统,如图 18a 所示. 然而,早期基于等效导电平面法的解释方法仅能提供隧道前方二维视电阻率分布(李貅等,2006;薛国强和李貅,2008). 针对二维探测难以实现异常的精准定位,孙怀凤等(2011)采用多项式拟合定义了回线源非中心点垂直分量的视电阻率,提出了如图 18b 所示的瞬变电磁多点阵列式探测方法,通过采集线圈内不同位置的瞬变电磁垂直分量响应实现了隧道瞬变电磁三维视电阻率成图. 然而,传统回线源装置由于多匝回线之间的互感效应易导致早期信号衰减缓慢,形成浅部探测盲区. 因此刘黎东等(2021)将等值反磁通瞬变电磁法引入到隧道超前探测中,发现对于浅部的异常响应会增大 3~5 倍,但其双向供电方式也会抵消部分一次场信号导致观测信号强度减弱.

瞬变电磁法超前探测在 TBM 隧道中面临的核心挑战是强电磁干扰,卢绪山(2014)通过数值模拟研究发现 TBM 至少要后退 10 m,在掌子面处的瞬变电磁场才可忽略来自 TBM 的电磁干扰. 针对此问题,当前研究主要沿三个方向展开. (1)干扰校正策略:隧道内金属体的干扰响应主要集中在早期,孙怀

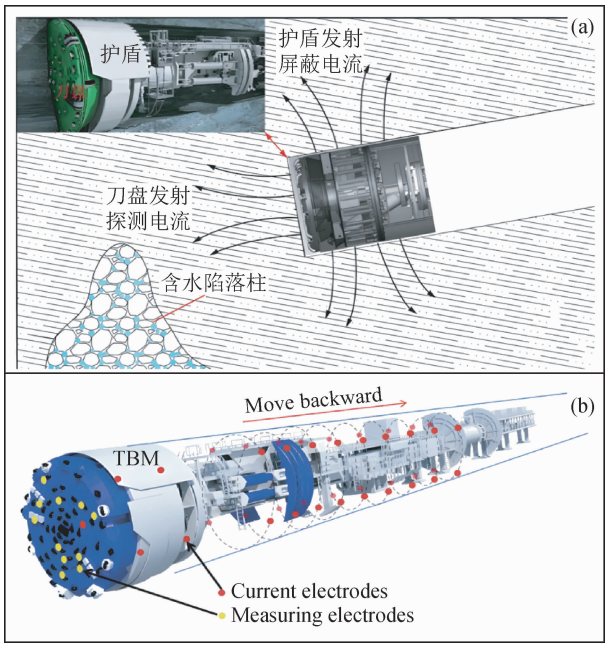


图 17　TBM 机载随掘电法观测系统
(张平松等,2021;李术才等,2018b)
(a)BEAM 综合法超前探测示意图;(b)随掘三维激发极化法观测系统.
Fig. 17　While tunneling electrical observation system assembled on a TBM (Zhang *et al*., 2021; Li *et al*., 2018b)
(a) Schematic diagram of BEAM integrated advanced detection; (b) Observation system for while tunneling 3D induced polarization method.

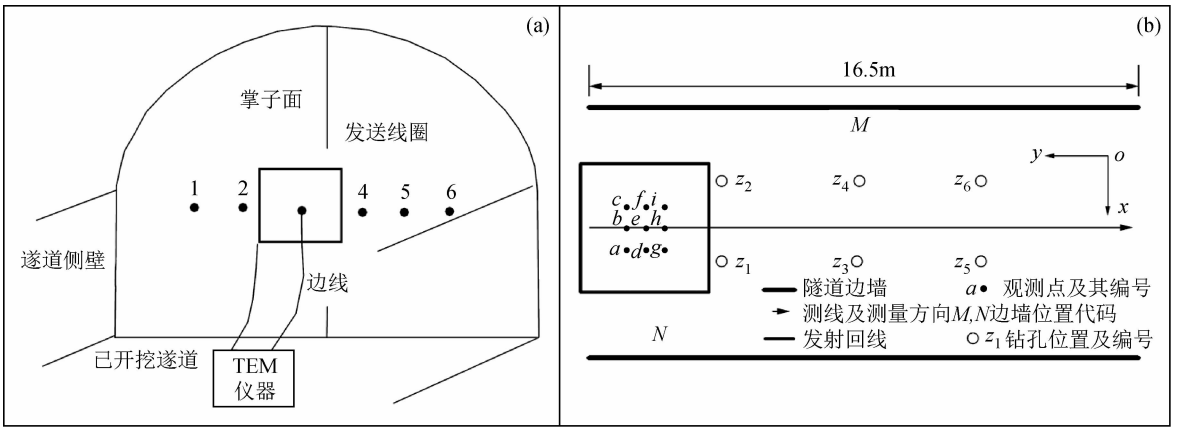


图 18 回线源瞬变电磁超前探测示意图(薛国强和李貅,2008;孙怀凤等,2011)

(a)单点超前探测;(b)多点阵列超前探测.

Fig. 18 Schematic diagram of advanced detection using a loop-source transient electromagnetic method (Xue and Li, 2008; Sun *et al*., 2011)

(a) Single-point advanced detection; (b) Multi-point array advanced detection.

凤等(2016)基于电磁场叠加原理,提出了总场响应减去 TBM 干扰响应的方法.韩自强(2022)通过比值法建立了校正系数,提取仅低阻异常引起的异常响应,提升信噪分离能力.然而,校正效果还需要在工程实践中进一步验证.(2)电性源发射以观测电场响应:胡佳豪等(2020)和 Li 等(2022)均发现在掌子面上采用电性源发射时,TBM 对水平电场分量干扰较弱,其观测系统如图 19a 所示.王其丁等(2024)进一步发现了多源探测方式更有利于在 TBM 强干扰环境下进行超前探测工作,多角度辐射下的全域视电阻率剖面对异常的分辨能力更强,其观测系统如图 19b 所示.然而,这种观测方式的电性源长度受隧道截面大小限制,发射磁矩小,探测距离较短.(3)远离干扰源的观测系统:巷—孔瞬变电磁方法(Tunnel-drilling Transient Electromagnetic Method, TDTEM)因其远离干扰源的优势,在煤巷掘进水害探测中应用较多.中国矿业大学和中煤科工集团研究集中在煤矿巷道中,结合地-井瞬变电磁法,进一步完善了巷—孔瞬变电磁法的基本理论,观测系统主要包括巷道发射—孔内接收和孔内发射—孔内接收的两种工作方式(储韬玉,2015;李世宁,2016).早期常在掌子面上采用回线源装置发射,如图 20a 所示.吕荣其(2021)探讨了如图 20b 所示的双偶极子线圈在钻孔瞬变电磁法上的优势与不足,虽然双偶极子发射的孔—孔探测模式比巷—孔探测模式的探测距离短,但是探测精度更优.山东大学将钻孔瞬变电磁法引入到隧道的超前探测中(张军,2020;孙

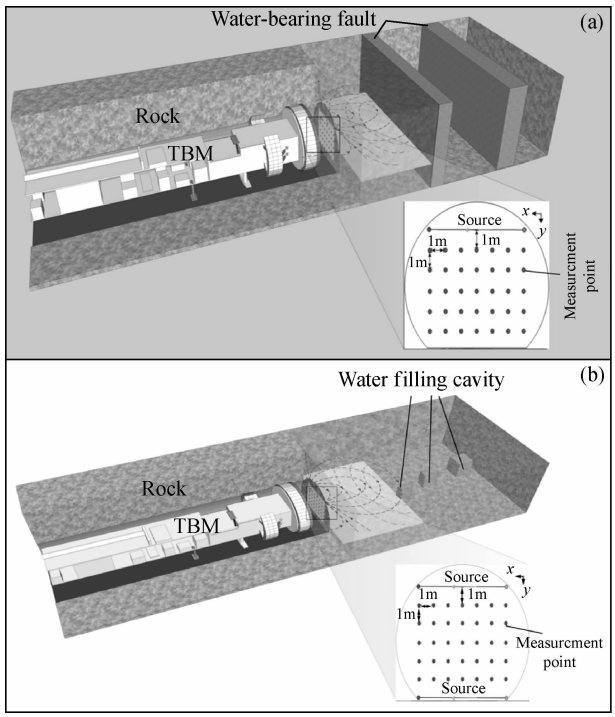


图 19 短电性源观测电场超前探测示意图

(Li *et al*., 2022;王其丁等,2024)

(a)单电性源超前探测;(b)多源超前探测.

Fig. 19 Schematic diagram of advanced detection using a short electric source array to observe electric field (Li *et al*., 2022; Wang *et al*., 2024)

(a) Advanced detection with a single electric source; (b) Multi-source advanced detection.

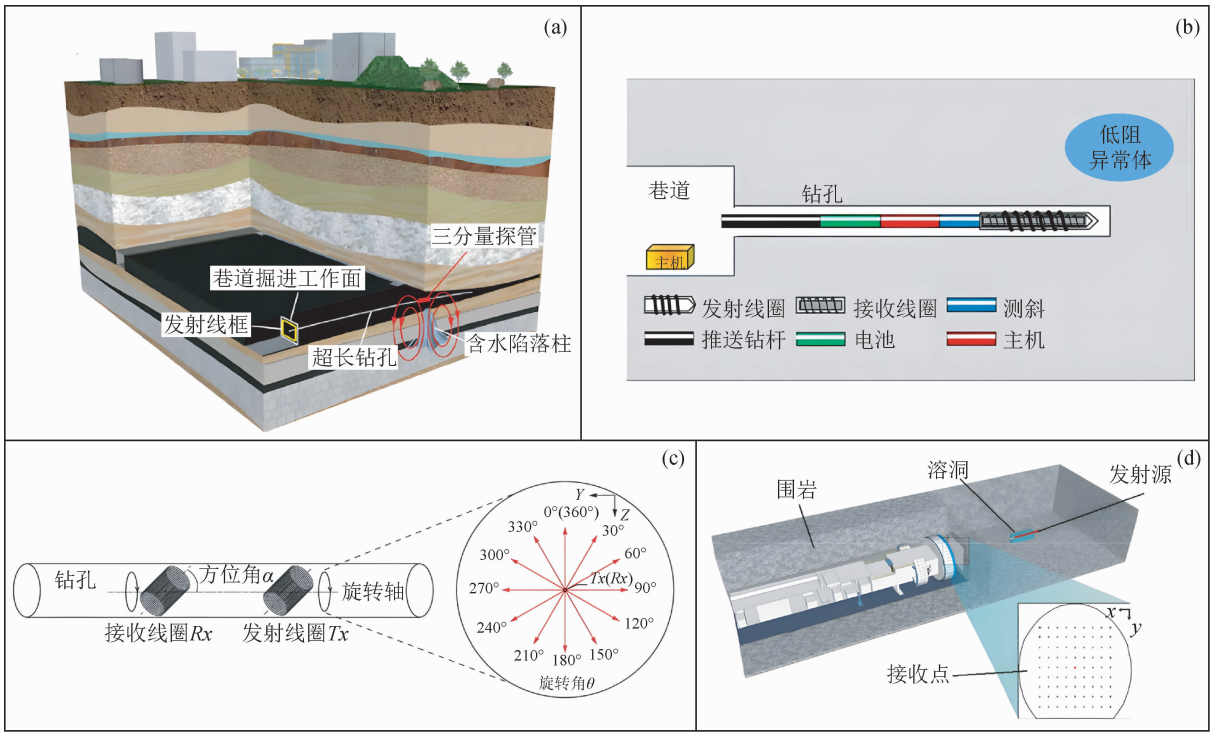


图 20　钻孔瞬变电磁超前探测示意图(张平松等,2021;程久龙等,2024a;李贺等,2024;范涛等,2025,2026)

(a)巷—孔回线源瞬变电磁;(b)孔中双偶极子瞬变电磁;(c)钻孔方位线圈扫描;(d)孔—巷电性源瞬变电磁.

Fig. 20　Schematic diagram of advanced detection using borehole transient electromagnetic method (Zhang *et al*., 2021; Cheng *et al*., 2024a; Li *et al*., 2024; Fan *et al*., 2025,2026)

(a) Roadway-borehole loop source TEM; (b) Borehole dipole-dipole TEM; (c) Borehole azimuthal coil scanning; (d) Borehole-roadway electric source TEM.

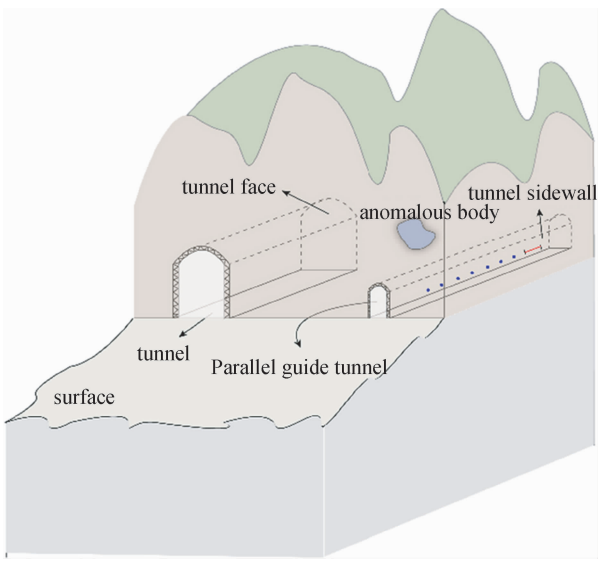


图 21　平行导向隧道电性源瞬变电磁超前探测示意图(Li *et al*., 2023)

Fig. 21　Schematic diagram of advanced detection using an electric source transient electromagnetic method in a parallel guiding tunnel(Li *et al*., 2023)

怀凤等,2022). 针对线圈互感效应与多解性问题,程久龙等(2024a,b)提出了如图 20c 所示的钻孔瞬变电磁法方位线圈扫描探测定位方法,采用最佳方位角的线圈装置,减小线圈互感,在钻孔内等间距移动并对孔壁进行 360°扫描,形成钻孔轴向与径向的全方位探测及反演成像. 辛成涛等(2024)在此基础上研究了线圈定向屏蔽技术,采用泡沫镍制成屏蔽罩安装于接收线圈上,可有效压制非探测方向的信号干扰,提高异常定位精度. 针对小规模目标体的探测,李贺等(2024)提出了如图 20d 所示的孔—巷电性源超前探测方法,将电性源放入孔中等间距移动并进行近距离激发,在掌子面上观测多分量瞬变电磁场. 然而,由于机械结构限制,TBM 配备的超前地质钻机的钻探方向与隧道轴线的最小夹角为 7°,难以向正前方钻探. 若不能实现系统集成,就需要 TBM 后退一定距离才可在掌子面进行探测工作,十分影响掘进效率. 在穿越复杂地质的深埋隧道时,通常会设计平行导向隧道,Li 等(2023)提出可利用其充分空间布设观测系统进行探测,如图 21 所示,但

是此方法依赖特定工程设计,经济成本较高且普适性不足.

2.3.2 随掘瞬变电磁超前探测

瞬变电磁法由于 TBM 干扰问题,发射系统难以与 TBM 集成,针对抗强干扰的探测需求,苗彬等(2016)、Jiang 等(2019)致力于地面发射、地下接收的地面—巷道瞬变电磁法研究,笔者借鉴此方法,结合随掘激发极化法中 TBM 搭载测量电极技术和电性源激发、观测电场的技术思想,提出了地—隧瞬变电磁随掘超前探测技术(高兆丰等,2025),观测系统如图 22 所示. 该方法采用大功率电磁发射机,给地面电性源持续通以阶跃波电流进行激发,在 TBM 上环状搭载 8 个电极,构成 6 组测量电极对,在掘进间隙进行多分量电场的同步采集,协同分析六个电场分量的异常响应特征组合,实现掌子面前方低阻异常体的识别与定位. 地—隧瞬变电磁随掘超前探测技术结合了观测电场和远离干扰源的方式,解决了施工空间受限和 TBM 金属干扰的问题,且增大了瞬变电磁超前探测距离,为实现 TBM 隧道中瞬变电磁法的掘探一体化提供了可行技术途径. 然而,地—隧超前探测方法仍停留在数值模拟和理论研究阶段,面临三维定量解释方法及专用仪器研制等技术难题,亟需进一步研究与突破.

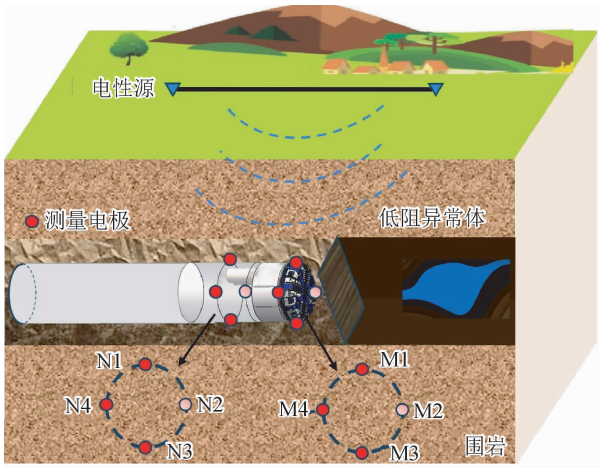


图 22 地隧瞬变电磁随掘探测装置示意图(高兆丰等,2025)

Fig. 22 Schematic diagram of surface-tunnel TEM while tunneling detection device (Gao *et al*., 2025)

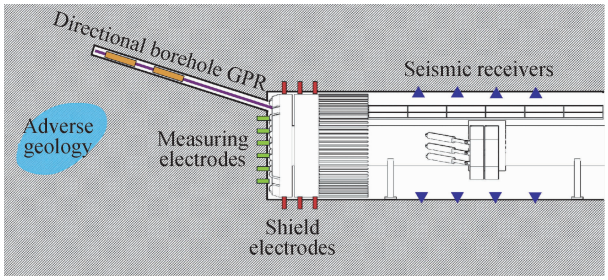


图 23 多技术集成一体化方案(Li *et al*., 2017)

Fig. 23 Multi-technology integration scheme (Li *et al*., 2017)

3 认识与展望

3.1 研究进展总结

本文系统地回顾了探地雷达法、地震波法、直流电阻率法、激发极化法与瞬变电磁法在 TBM 隧道中的研究进展,各地球物理超前探测技术进展主要表现在不断优化的观测系统,实现了二维解释到三维成像的跨越;为了适应 TBM 隧道快速、连续掘进的发展模式,最终都通过探测系统与 TBM 的集成,将超前探测作业逐步融入到掘进工序中,即实现掘探一体化. 目前,针对不良地质体的超前探测技术已率先实现了真正的掘探一体化随掘监测,探地雷达法通过扫描方式革新,已能搭载于刀盘实现随掘圆周扫描探测,地震波法则通过利用破岩振动作为震源,实现了“停机探测”到“动态监测”的转变;相比之下,针对突水灾害源的电法类探测仍需要 TBM 停机进行探测工作,但得益于探测系统的集成,其所需停机时间已大幅缩减,施工空间受限和强电磁干扰问题也得到显著缓解,为真正实现突水灾害源的随掘监测奠定了重要基础. 当前掘探一体化技术在探测可靠性、智能化水平与系统普遍性方面还面临挑战,未来的发展将不再局限于单一方法的改进,必然走向多技术协同、智能算法驱动与数字化的深度融合.

3.2 多技术集成与联合反演

为应对复杂地质条件的精准探测需求,发展高度集成、多方法协同的随掘动态监测系统是必然方向. 图 23 展示了一种融合随掘地震超前探测、三维激发极化法与钻孔雷达的一体化方案,旨在通过多物理场数据的同步采集与相互验证,从根源上提高数据维度. 多源信息融合成为提高解释可靠性的关键途径,多种先验信息约束,能有效压制反演多解性,实现对异常区的精准圈定. 实现一体化协同采集依赖于传感器硬件的革新与数据预处理技术的发展. 在硬件层面,研发如光纤电流传感器等嵌入式传感器,可有效抑制因电极耦合问题引起漏电而导致的噪声干扰(高昕星等,2018);在信号处理方面,针

对刀盘破岩产生的随机、复杂的信号,发展先进的去噪与地震记录重构等方法(张凤凯,2020;李圣林等,2022),是推动地震随掘探测的重点研究方向.

3.3　透明地质与智能感知

深度学习技术因其强大的特征学习与非线性映射能力被引入到地球物理数据解译中,展现出强大的智能识别潜力(范涛等,2021,2022;程久龙等,2023).发展智能反演与实时解译算法,从而将人工经验主导的解译转变为系统自动完成的实时决策.在探测系统与 TBM 深度集成的基础上,需重点构建大数据快速处理与智能化控制平台,逐步推进少人化超前操控,以实现 TBM 施工全过程的地质透明化与智能感知(袁亮和张平松,2023).

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Ashida Y. 2001. Seismic imaging ahead of a tunnel face with three-component geophones. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(6): 823-831, doi: 10.1016/S1365-1609(01)00047-8.

Bohlen T, Giese R, Müller C, *et al*. 2003. Modeling of seismic waves around a tunnel with irregular wall. //65th EAGE Conference & Exhibition. Stavanger, Norway: European Association of Geoscientists & Engineers, doi: 10.3997/2214-4609-pdb.6.P242.

Cetinkaya H, Yarovoy A. 2014. Near field beam patterns of circularly rotating phased array. //The 8th European Conference on Antennas and Propagation. The Hague, Netherlands: IEEE, 2804-2808, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902409.

Cheng D S, Luo C H, Zhu Z, *et al*. 2019. Application of ISP system for advanced geological prediction of a tunnel construction in Xizang. Yunnan Water Power (in Chinese), 35(2): 71-75, doi: 10.3969/j.issn.1006-3951.2019.02.019.

Cheng J L, Wang Y H, Yu S J, *et al*. 2000. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 28(4): 60-62.

Cheng J L, Wang H J, Xu Z Z, *et al*. 2023. Research on aquifer water abundance evaluation by borehole transient electromagnetic method based on FCNN. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 51(1): 289-297, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2023.01.023.

Cheng J L, Jiang C L, Li Y, *et al*. 2024a. Research on borehole transient electromagnetic positioning method of azimuthal coil scanning detection. Journal of China Coal Society (in Chinese), 49(1): 616-627, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1225.

Cheng J L, Jiao J J, Chen Z, *et al*. 2024b. 2.5D inversion of borehole transient electromagnetic method with scanning detection based on RCQPSO-LMO combined algorithm. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(2): 781-792, doi: 10.6038/cjg2023R0220.

Chu T Y. 2015. Study on the mine transient electromagnetic method in drilling and its application[Master's thesis] (in Chinese). Xuzhou: China University of Mining and Technology.

Cui F, Geng X H, Yu H T, *et al*. 2019. Application research of GPR advanced detection in small structure of coal seam. Safety in Coal Mines (in Chinese), 50(5): 153-157, doi: 10.13347/j.cnki.mkaq.2019.05.039.

Deng X K. 2013. Research of DC focusing resistivity advanced detection in tunnel[Ph. D. thesis] (in Chinese). Changsha: Central South University.

Duan W, Xie X, Zhu T, *et al*. 2024. GPR circumferential survey line radius's effect on shield machine tunnel look-ahead detection. Journal of Physics: Conference Series, 2887(1): 012056, doi: 10.1088/1742-6596/2887/1/012056.

Fan J D, Feng H, Song Z Y, *et al*. 2022. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine. Journal of China Coal Society (in Chinese), 47(1): 499-514, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1951.

Fan T, Zhang Y Z, Zhao R, *et al*. 2021. Advance detection method of rapid excavation based on borehole TEM intelligent stereo imaging. Journal of China Coal Society (in Chinese), 46(2): 578-590, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.XR20.1676.

Fan T, Xue G Q, Li P, *et al*. 2022. TEM real-time inversion based on long-short term memory network. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(9): 3650-3663, doi: 10.6038/cjg2022P0572.

Fan T, Hao Y, Li P, *et al*. 2025. A method for advance detection of underground concealed water hazards in coal mines based on borehole transient electromagnetic method and vector synthesis. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 53(11): 1-11, doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.05.0311.

Fan T, Liu Z B, Cheng J Y, *et al*. 2026. Construction method of a transparent tunneling geological navigation system based on integrated borehole geophysical exploration. Coal Science and Technology (in Chinese), 54(2): 387-400.

Fu W, Zhang W Z, Liu Z Y, *et al*. 2023. Study on the suitability of advanced geological prediction methods for TBM tunnel construction. Journal of Railway Engineering Society (in Chinese), 40(10): 81-85, 92, doi: 10.3969/j.issn.1006-2106.2023.10.015.

Gao X X, Zhao B, Lu L Y, *et al*. 2018. BEAM tunnel advanced geological prediction method based on optical fiber current sensing. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 42(2): 412-421, doi: 10.11720/wtyht.2018.2.28.

Gao Z F, Jiang Z H, Li M F, *et al*. 2024. Vector resistivity monitoring technology assembled on a TBM. Journal of Geophysics and Engineering, 21(6): 1699-1709, doi: 10.1093/jge/gxae102.

Gao Z F, Jiang Z H, Zhu J, *et al*. 2025. Response characteristics of surface-tunnel transient electromagnetic-while-tunneling advanced detection in TBM tunnels. Journal of China Coal Society (in Chinese), 50(12): 5240-5252, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.KT25.0648.

Gong J F, Wang W, Li X, *et al*. 2025. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2024 and overview of tunnels of new projects in 2024. Tunnel Construction (in Chinese), 45(3): 636-653, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2025.03.019.

Han D P, Li D, Cheng J L, *et al*. 2010. DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer. Journal of China Coal Society (in Chinese), 35(4): 635-639.

Han Z Q. 2022. Influence and correction research of metal objects near the tunnel face on TEM advanced geological forecast data. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(2): 824-835, doi: 10.6038/pg2022FF0527.

He C, Feng K, Fang Y. 2015. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method. Journal of Southwest Jiaotong University (in Chinese), 50(1): 97-109, doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.2015.01.015.

He X. 2014. A numerical simulation research to the Rayleigh surface wave of the tunnel engineering[Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University.

Hong K R. 2017. Development and prospects of tunnels and underground

works in China in recent two years. Tunnel Construction (in Chinese), 37(2): 123-134, doi: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.02.002.

Hong K R, Du Y L, Chen K, *et al*. 2022. Full-face tunnel boring machines (shields/TBMs) in China: history, achievements, and prospects. Tunnel Construction (in Chinese), 42(5): 739-756, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2022.05.001.

Hu D M. 2022. Study on prediction models of advanced detection in tunnels using resistivity method with anisotropic medium and long electrode source[Ph. D. thesis] (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China.

Hu D M, Tezkan B, Yue M X, *et al*. 2022. A new method of 3D direct current resistivity modelling using a long electrode source for forward probing in tunnels. Near Surface Geophysics, 20(6): 590-606, doi: 10.1002/nsg.12224.

Hu J H. 2020. Research on transient electromagnetic advanced detection of TBM construction tunnel[Master's thesis] (in Chinese). Xi'an: Chang'an University, doi: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.000080.

Hu J H, Li X, Liu H, *et al*. 2020. Research on the advanced detection of transient electromagnetic in tunnel construction by TBM. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 44(5): 1183-1189, doi: 10.11720/wtyht.2020.1606.

Hu X W, Zhang P S, Wu R X, *et al*. 2010. Study on the advanced detection technique by multi-electrode direct current resistivity in mines. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(5): 1709-1715, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.026.

Hu X W, Zhang P S. 2019. Analysis of hidden collapse column ahead of tunneling face detected by DC resistivity method. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(3): 1176-1183, doi: 10.6038/pg2019CC0212.

Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. 2006. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49(5): 1529-1538.

Huang J G, Ruan B Y, Wang J L. 2007. The inner core's super rotation and its influences on the gravity field. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50(2): 619-624.

Inazaki T, Isahai H, Kawamura S, *et al*. 1999. Stepwise application of horizontal seismic profiling for tunnel prediction ahead of the face. Lead. Edge, 18(12): 1429-1431, doi: 10.1190/1.1438246.

Jiang C J. 2009. Study on methods of Rayleigh surface wave data processing[Master's thesis] (in Chinese). Changsha: Central South University, doi: 10.7666/d.y1534598.

Jiang Z H, Liu L B, Liu S C, *et al*. 2019. Surface-to-underground transient electromagnetic detection of water-bearing goaves. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(8): 5303-5318, doi: 10.1109/tgrs.2019.2898904.

Kaus A, Boening W. 2008. BEAM-Geoelectrical ahead monitoring for TBM-Drives. Geomechanik und Tunnelbau, 1(5): 442-449, doi: 10.1002/geot.200800048.

Lüth S, Giese R, Rechlin A. 2008. A seismic exploration system around and ahead of tunnel excavation-onsite. // World Tunnel Congress. Agra, India, 119-125.

Li B J. 2009. Research on geological detection method and image analysis of ground penetrating radar applied to shield tunnel excavation face[Master's thesis] (in Chinese). Shanghai: Tongji University, doi: 10.7666/d.y1449879.

Li C S, Gu T, Ding J F, *et al*. 2008. Horizontal Sound Probing (HSP) geology prediction method appropriated to TBM construction. // Proceedings of the 8th National Conference on Engineering Geology (in Chinese). Shanghai: Geological Publishing House, 111-115.

Li D, Du W F, Xu X L. 2018. Study on advanced detection method and application of mine geological radar. Coal Science and Technology (in Chinese), 46(7): 223-228, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2018.07.035.

Li H J, Li X Z, Guo L. 2011. Application of ground penetrating radar in advanced forecast of mine tunnel. Chinese Journal of Underground Space and Engineering (in Chinese), 7(S2): 1742-1746, 1752.

Li K Y, Li H, Liu Z. 2023. Appraisal of a galvanic-source transient electromagnetic method for hazardous water structures beyond tunnel sidewall. Environmental Earth Sciences, 82(21): 520, doi: 10.1007/s12665-023-11208-3.

Li S C, Liu B, Sun H F, *et al*. 2014. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 33(6): 1090-1113.

Li S C, Nie L C, Liu B, *et al*. 2015. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58(4): 1434-1446, doi: 10.6038/cjg20150429.

Li S C, Liu B, Xu X J, *et al*. 2017. An overview of ahead geological prospecting in tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology, 63: 69-94, doi: 10.1016/j.tust.2016.12.011.

Li S C, Xu Z H, Huang X, *et al*. 2018a. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 37(5): 1041-1069, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1332.

Li S C, Nie L C, Liu B. 2018b. The practice of forward prospecting of adverse geology applied to hard rock TBM tunnel construction: The case of the Songhua River water conveyance project in the middle of Jilin Province. Engineering, 4(1): 131-137, doi: 10.1016/j.eng.2017.12.010.

Li S L, Zhang P S, Ji G Z, *et al*. 2022. Compound interference processing of road header source signal for advanced seismic detection while drilling. Journal of Mining & Safety Engineering (in Chinese), 39(2): 305-316, doi: 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0164.

Li S N. 2016. Study on the mine tunnel-drilling transient electromagnetic method and its application[Master's thesis] (in Chinese). Xuzhou: China University of Mining and Technology.

Li W H, Wang J X, Guo X, *et al*. 2022. A new transient electromagnetic prospecting method in TBM tunnel environment. Journal of Applied Geophysics, 196: 104492, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104492.

Li X, Wu J J, Cao D M, *et al*. 2006. Advanced geologic forecasting for unfavorable geological body with water—Transient electromagnetic method. Geotechnical Investigation & Surveying (in Chinese), 34(3): 70-75.

Li X J. 1992. Study and experiment on heading detecting by fixed electric source gradient method in underground. Coal Geology & Exploration (in Chinese), (4): 59-63.

Li Y. 2017. The crosshole GPR ahead prospecting method and its application for adverse geology in tunnel construction[Ph. D. thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University.

Liang Q H, Wu Y Q, Song J, *et al*. 2014. Experimental study on advanced detection in coal seam driving roadway by ground penetrating radar. Coal Science and Technology (in Chinese), 42(5): 91-94.

Liu B, Li S C, Li S C, *et al*. 2009. Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method. Rock and Soil Mechanics (in Chinese), 30(10): 3093-3101, doi: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.10.035.

Liu B, Li S C, Nie L C, *et al*. 2012. Advanced detection of water-bearing geological structures in tunnels using 3D DC resistivity inversion tomography method. Chinese Journal of Geotechnical Engineering (in Chinese), 34(10): 1866-1876.

Liu B, Li S C, Li J B, *et al*. 2016. Integrated acquisition method of adverse geology and rock properties ahead of tunnel face in TBM construction tunnel. Journal of Shandong University (Engineering Science) (in Chinese), 46(6): 105-112, doi: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2016.478.

Liu J G, Lu S, Li C L. 2021. A case study on HSP geological prediction for subsea tunnels constructed by the double model TBM. Modern Tunnelling Technology (in Chinese), 58(S1): 575-580, doi: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.S1.073.

Liu J G, Cui Q L, Li D N, *et al*. 2024. Statistics and analysis of super-long highway tunnels over 10 km in China by the end of 2023. Tunnel Construction (in Chinese), 44(1): 189-198, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.01.018.

Liu L D, Zhang F X, Zhang J F, *et al*. 2021. Simulation and application of tunnel TEM advanced detection based on opposing-coils configuration. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(6): 2730-2737, doi: 10.6038/pg2021FF0130.

Liu Q W. 2001. Underground electrical lead survey method and its application. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 29(5): 60-62, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2001.05.021.

Lu S, Li C S, Wu F S, *et al*. 2017. Application of HSP (Horizontal Sonic Profiling) sound wave reflection method to geological prediction of TBM tunnel of Hanjiang River-Weihe River Water Diversion Project. Tunnel Construction (in Chinese), 37(2): 236-241, doi: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.02.017.

Lu S, Wang X, Li C S, *et al*. 2020. Study on geological prediction technology of HSP method for TBM tunnel. Modern Tunnelling Technology (in Chinese), 57(3): 30-35, doi: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.03.005.

Lu X S. 2014. Three dimensional parallel simulation of transient electromagnetic response of tunnel boring machine and the elimination of its response[Master's thesis] (in Chinese). Xi'an: Chang'an University, doi: 10.7666/d.D557172.

Lü R Q. 2021. Research on transient electromagnetic detection device in mine hole and its characteristics [Master's thesis] (in Chinese). Xuzhou: China University of Mining and Technology, doi: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001081.

Miao B, Jiang Z H, Liu S C. 2016. Design and application of transient electromagnetic detection system on mine surface ground and in underground mine roadway. Coal Science and Technology (in Chinese), 44(12): 148-153, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2016.12.026.

Otto R, Button E A, Bretterebner H, *et al*. 2002. The application of TRT-true reflection tomography-at the Unterwald Tunnel. Felsbau, 20(2): 51-56.

Petronio L, Poletto F. 2002. Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise. Geophysics, 67(6): 1798-1809, doi: 10.1190/1.1527080.

Petronio L, Poletto F, Schleifer A. 2007. Interface prediction ahead of the excavation front by the tunnel-seismic-while-drilling (TSWD) method. Geophysics, 72(4): G39-G44.

Poletto F, Petronio L. 2006. Seismic interferometry with a TBM source of transmitted and reflected waves. Geophysics, 71(4): SI85-SI93, doi: 10.1190/1.2213947.

Qi M X. 2021. Development, current status, and prospects of TBM tunneling technology in China. Tunnel Construction (in Chinese), 41(11): 1964-1979, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.11.011.

Qian Q H. 2012. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 31(10): 1945-1956, doi: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.10.001.

Qian Q H, Lin P. 2016. Safety risk management of underground engineering in China: Progress, challenges and strategies. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(4): 423-442, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.04.001.

Qian Q H, Hu X Q, Li S C, *et al*. 2024. Recent advances in key technologies of shield tunnel engineering in China. Tunnel Construction (in Chinese), 44(5): 897-926, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.05.001.

Qian Z Y. 2023. Research on data processing method of directional borehole radar for tunnel ahead prospecting[Master's thesis] (in Chinese). Shandong University, doi: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.003064.

Qiang J K, Ruan B Y, Zhou J J, *et al*. 2011. The feasibility of advanced detection using DC three-electrode method in coal-mine tunnel. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(1): 320-326, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.038.

Sattel G, Sander B K, Amberg F, *et al*. 1996. Tunnel seismic prediction TSP-some case histories. Tunnels Tunnel. April: 24-30.

Shandong University. 2015-11-25. Tunnel boring machine rock breaking seismic source and active source three-dimensional seismic combined advanced detection system (in Chinese): CN, 201510106445.2.

Song A. 2017. The research on tunnel seismic prediction of TBM tunnel [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2017.000163.

Song A, Song B, Qian R Y. 2019. Experiment of 3D seismic reflection technique for forward probing on TBM tunnel face. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 24(4): 609-619, doi: 10.2113/JEEG24.4.609.

Song A. 2020. Research on intelligent advance prediction technology based on tunnel face using 3D seismic detection[Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.001600.

Song J. 2016. The three-dimensional seismic ahead prospecting method and its application for adverse geology in tunnel construction[Ph. D. thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University.

Sun H F, Li S C, Li X, *et al*. 2011. Research on transient electromagnetic multipoint array detection method in tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 30(11): 2225-2233.

Sun H F, Li X, Lu X S, *et al*. 2016. Transient electromagnetic responses in tunnels with strong interferences and the correcting method: A TBM example. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(12): 4720-4732, doi: 10.6038/cjg20161231.

Sun H F, Zhang Y Y, Zhao Y C, *et al*. 2022. Present study situation review of borehole transient electromagnetic method. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 50(7): 85-97, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2022.07.011.

Tongji University, Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd. 2025-05-30. Shield cutter head integrated ground penetrating radar antenna device (in Chinese): CN, 202510188081.0.

Wang D J, He F, Wang Y, *et al*. 2020. Tunnel boring machine (TBM) in coal mine and its intelligent key technology. Journal of China Coal Society (in Chinese), 45(6): 2031-2044, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.zn20.0206.

Wang L, Zhang H, Wu J W. 2017. Study on fine prediction technology of water bearing structure in tunnel with strong water-rich strata. Journal of Railway Science and Engineering (in Chinese), 14(12): 2660-2669, doi: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.12.020.

Wang Q D, Li W H, Liu W T, *et al*. 2024. Research on multi-source transient electromagnetic imaging method in TBM tunnel environment. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(6): 2463-2470, doi: 10.6038/pg2024HH0478.

Wen S R. 2015. Study on advanced detection technology of highway tunnel based on ground penetrating radar in karst area[Ph. D. thesis] (in Chinese). Xi'an: Chang'an University, doi: 10.7666/d.D747572.

Xin C T, Cheng J L, Li Y, *et al*. 2024. Physical simulation on directional shielding of receiving coil in borehole transient electromagnetic method. Journal of China Coal Society (in Chinese), 49(7): 3178-3187, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0798.

Xu X J. 2017. TBM rock-breaking source seismic method and its

applications for ahead geological prospecting in TBM construction tunnel[Ph. D. thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University, doi: 10.27272/d.cnki.gshdu.2017.000098.

Xue G Q, Li X. 2008. The technology of TEM tunnel prediction imaging. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51(3): 894-900.

Yan H, Wu L, Li G C, *et al*. 2025. Research progress and prospects of rapid TBM excavation in coal mine rock roadways. Coal Engineering (in Chinese), 57(1): 1-7, doi: 10.11799/ce202501001.

Yang L J, Yang Z W, Wang D, *et al*. 2021. Application of HSP method in geological prediction of Daliangshan No. 1 TBM construction tunnel. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 18(5): 647-654, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2021.05.014.

Ye C. 2006. The application of ground penetrating radar to shielded tunnel boring machine's frontal detection research[Master's thesis] (in Chinese). Shanghai: Tongji University, doi: 10.7666/d.y844847.

Yuan L, Zhang P S. 2023. Research progress and thinking on integrated tunneling and detection technology of rock roadway with TBM. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 51(1): 21-32, doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.12.0967.

Yue J H, Teng X Z, Xi D Y, *et al*. 2025. Research on simulation and application of mine dipole-dipole advance detection device by direct current method. Journal of China Coal Society (in Chinese), 50(1): 564-571, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0943.

Zeng Z F, Liu S X, Wang Z J, *et al*. 2006. Ground Penetrating Radar: Methods, Principles and Applications (in Chinese). Beijing: Science Press.

Zhang A X, Jiang Y S, Wang W B. 2002. An imaging method for circular ground-penetrating radar. Acta Electronica Sinica (in Chinese), 30(6): 853-856, doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2002.06.022.

Zhang C M, Zhang F K, Li Y. 2019. Study of full waveform inversion of advance tunnel geological prediction by ground penetrating radar. Tunnel Construction (in Chinese), 39(1): 102-109, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.01.013.

Zhang F K. 2020. Full waveform inversion and inverse time migration imaging method of the seismic data while tunneling using TBM drilling noise in tunnel[Ph. D. thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University.

Zhang H W, Hu Z F, Cheng J Y, *et al*. 2021. TBM techniques for intelligent excavating large-section rock roadway in the deep high-temperature coal mines: Application of TBM in Xinkuang No. 1 TBM. Journal of China Coal Society (in Chinese), 46(7): 2174-2185, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.JJ21.0579.

Zhang J. 2020. Study on transient electromagnetic response characteristics of borehole and water body positioning[Master's thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University.

Zhang P S, Li S L, Qiu S, *et al*. 2021. Advance detection technology and development of fast intelligent roadway drivage. Journal of China Coal Society (in Chinese), 46(7): 2158-2173, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.JJ21.0562.

Zhang S, Chen Z, Lu S, *et al*. 2024. Application of the horizontal seismic profiling-based advance detection technology to the excavation of rock roadways in coal mines using tunnel boring machines. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 52(3): 107-117, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.07.0451.

Zhao Y G, Jiang H, Zhao X P. 2006. Tunnel seismic tomography method for geological prediction and its application. Appl. Geophys., 3(2): 69-74, doi: 10.1007/s11770-006-0010-7.

Zhao Z Y, You Y M, Meng L, *et al*. 2021. Improvement and application of horizontal sonic/seismic profiling method in advance geological prediction of shield tunneling. Tunnel Construction (in Chinese), 41(8): 1344-1352, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.08.010.

Zhou Q C, Cui T, He Z Q, *et al*. 2006. Investigation on geological forecast using GPR during shield-driven tunneling. Chinese Journal of Construction Machinery (in Chinese), 4(3): 331-334.

Zhou Q C, He H Y, Li J, *et al*. 2007. Simulated test on ground penetrating radar for shield-driven construction front. Chinese Journal of Construction Machinery (in Chinese), 5(2): 210-214, doi: 10.3969/j.issn.1672-5581.2007.02.018.

Zhou Q C, Feng S C, Li B J, *et al*. 2009. Modeling and recognition of GPR image of unfavorable geology. Chinese Journal of Underground Space and Engineering (in Chinese), 5(6): 1110-1114, doi: 10.3969/j.issn.1673-0836.2009.06.009.

Zhou Q C, Chen Q F, Jiang S N, *et al*. 2010a. Working parameters selection for ground penetrating radars during frontal-detection shielded tunneling. Chinese Journal of Construction Machinery (in Chinese), 8(3): 353-357, doi: 10.3969/j.issn.1672-5581.2010.03.021.

Zhou Q C, Feng S C, Chen H Y, *et al*. 2010b. The design of radar protection board for frontal geological detection of shield construction. Journal of Machine Design (in Chinese), 27(1): 68-70, doi: 10.13841/j.cnki.jxsj.2010.01.016.

Zhu J, Li T B, Li Y L, *et al*. 2007. Application of an electrical method "BEAM" for advanced geological exploration to tunneling in Tongluo Mountains for Dian-Lin Highway. Journal of Engineering Geology (in Chinese), 15(2): 258-262.

Zhu Z. 2017. The application and research of the ISP geological prediction system for the TBM constructed tunnels[Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

附中文参考文献

程德胜, 罗春华, 朱仲, 等. 2019. 西藏某隧道施工超前地质预报ISP系统的应用研究. 云南水力发电, 35(2): 71-75, doi: 10.3969/j.issn.1006-3951.2019.02.019.

程久龙, 王玉和, 于师建, 等. 2000. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用. 煤田地质与勘探, 28(4): 60-62.

程久龙, 王慧杰, 徐忠忠, 等. 2023. 基于全卷积神经网络的钻孔瞬变电磁法岩层富水性预测研究. 煤田地质与勘探, 51(1): 289-297, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2023.01.023.

程久龙, 姜成麟, 李垚, 等. 2024a. 钻孔瞬变电磁法方位线圈扫描探测定位方法. 煤炭学报, 49(1): 616-627, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1225.

程久龙, 焦俊俊, 陈志, 等. 2024b. 钻孔瞬变电磁法扫描探测RCQPSO-LMO组合算法2.5D反演. 地球物理学报, 67(2): 781-792, doi: 10.6038/cjg2023R0220.

储韬玉. 2015. 矿井孔中瞬变电磁测量方法及其应用研究[硕士论文]. 徐州: 中国矿业大学.

崔凡, 耿晓航, 俞慧婷, 等. 2019. 基于探地雷达的煤层小构造超前探测. 煤矿安全, 50(5): 153-157, doi: 10.13347/j.cnki.mkaq.2019.05.039.

邓小康. 2013. 隧道直流电阻率法超前聚焦探测研究[博士论文]. 长沙: 中南大学.

范京道, 封华, 宋朝阳, 等. 2022. 可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备. 煤炭学报, 47(1): 499-514, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1951.

范涛, 张幼振, 赵睿, 等. 2021. 基于钻孔TEM智能立体成像的快速掘进超前探测方法. 煤炭学报, 46(2): 578-590, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.XR20.1676.

范涛, 薛国强, 李萍, 等. 2022. 瞬变电磁长短时记忆网络深度学习实时反演方法. 地球物理学报, 65(9): 3650-3663, doi: 10.6038/cjg2022P0572.

范涛, 郝跃, 李萍, 等. 2025. 煤矿井下孔中瞬变电磁矢量合成超前探测方法. 煤田地质与勘探, 53(11): 1-11, doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.05.0311.

范涛, 刘再斌, 程建远, 等. 2026. 基于钻孔综合物探的透明掘进地质导航系统构建方法. 煤炭科学技术, 54(2): 387-400.

付伟, 张文忠, 刘征宇, 等. 2023. TBM 施工隧道超前地质预报方法适宜性研究. 铁道工程学报, 40(10): 81-85, 92, doi: 10.3969/j.issn.1006-2106.2023.10.015.

高昕星, 赵斌, 路丽勇, 等. 2018. 基于光纤电流传感的 BEAM 隧道超前地质预报方法. 物探与化探, 42(2): 412-421, doi: 10.11720/wtyht.2018.2.28.

高兆丰, 姜志海, 朱姣, 等. 2025. 盾构隧道地—隧瞬变电磁随掘超前探测技术. 煤炭学报, 50(12): 5240-5252, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.KT25.0648.

巩江峰, 王伟, 黎旭, 等. 2025. 截至 2024 年底中国铁路隧道情况统计及 2024 年新开通项目隧道情况介绍. 隧道建设(中英文), 45(3): 636-653, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2025.03.019.

韩德品, 李丹, 程久龙, 等. 2010. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法. 煤炭学报, 35(4): 635-639.

韩自强. 2022. 隧道掌子面附近金属物对瞬变电磁超前地质预报数据的影响及校正研究. 地球物理学进展, 37(2): 824-835, doi: 10.6038/pg2022FF0527.

何川, 封坤, 方勇. 2015. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望. 西南交通大学学报, 50(1): 97-109, doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.2015.01.015.

贺新. 2014. 隧道瑞利面波波场数值模拟研究[硕士论文]. 成都: 西南交通大学.

洪开荣. 2017. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望. 隧道建设(中英文), 37(2): 123-134, doi: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.02.002.

洪开荣, 杜彦良, 陈馈, 等. 2022. 中国全断面隧道掘进机发展历程、成就及展望. 隧道建设(中英文), 42(5): 739-756, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2022.05.001.

胡代明. 2022. 各向异性介质及长电极源电阻率法隧道超前探预测模型研究[博士论文]. 合肥: 中国科学技术大学.

胡佳豪. 2020. TBM 施工隧道瞬变电磁超前探测研究[硕士论文]. 西安: 长安大学, doi: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.000080.

胡佳豪, 李貅, 刘航, 等. 2020. TBM 机施工隧道瞬变电磁超前探测研究. 物探与化探, 44(5): 1183-1189, doi: 10.11720/wtyht.2020.1606.

胡雄武, 张平松, 吴荣新, 等. 2010. 矿井多极供电电阻率法超前探测技术研究. 地球物理学进展, 25(5): 1709-1715, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.026.

胡雄武, 张平松. 2019. 坑道隐伏陷落柱直流电阻率法超前探测分析. 地球物理学进展, 34(3): 1176-1183, doi: 10.6038/pg2019CC0212.

黄俊革, 王家林, 阮百尧. 2006. 坑道直流电阻率法超前探测研究. 地球物理学报, 49(5): 1529-1538.

黄俊革, 阮百尧, 王家林. 2007. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演. 地球物理学报, 50(2): 619-624.

蒋婵君. 2009. 瑞雷面波资料处理方法研究[硕士论文]. 长沙: 中南大学, doi: 10.7666/d.y1534598.

李炳杰. 2009. 探地雷达应用于盾构开挖面的地质探测方法与图像分析研究[硕士论文]. 上海: 同济大学, doi: 10.7666/d.y1449879.

李苍松, 谷婷, 丁建芳, 等. 2008. 适合于 TBM 施工的 HSP 声波反射法地质超前预报. //第八届全国工程地质大会论文集. 上海: 地质出版社, 111-115.

李冬, 杜文凤, 许献磊. 2018. 矿井地质雷达超前探测方法及应用研究. 煤炭科学技术, 46(7): 223-228, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2018.07.035.

李贺,李貅,戚志鹏,等. 2024. 孔—巷瞬变电磁隧道不良地质体超前预报方法研究. 物探与化探, 48(5):1215-1222,doi: 10.11720/wtyht.2024.1277.

李红军, 李晓昭, 郭亮. 2011. 探地雷达在矿山井巷工程超前预报中的应用. 地下空间与工程学报, 7(S2): 1742-1746, 1752.

李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 2014. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势. 岩石力学与工程学报, 33(6): 1090-1113.

李术才, 聂利超, 刘斌, 等. 2015. 多同性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究. 地球物理学报, 58(4): 1434-1446, doi: 10.6038/cjg20150429.

李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 2018a. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析. 岩石力学与工程学报, 37(5): 1041-1069, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1332.

李术才, 聂利超, 刘斌. 2018b. TBM 施工隧洞不良地质超前预报实践——以吉林省中部城市引松供水工程为例. 工程(英文), 4(1): 131-137, doi: 10.1016/j.eng.2017.12.010.

李圣林, 张平松, 姬广忠, 等. 2022. 随掘地震超前探测掘进机震源信号的复合干涉处理研究. 采矿与安全工程学报, 39(2): 305-316, doi: 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0164.

李世宁. 2016. 矿井巷孔瞬变电磁法应用研究[硕士论文]. 徐州: 中国矿业大学.

李貅, 武军杰, 曹大明, 等. 2006. 一种隧道水体不良地质体超前地质预报方法——瞬变电磁法. 工程勘察, 34(3): 70-75.

李学军. 1992. 煤矿井下定点源梯度法超前探测试验研究. 煤田地质与勘探, (4): 59-63.

李尧. 2017. 隧道施工不良地质跨孔雷达超前探测方法与工程应用[博士论文]. 济南: 山东大学.

梁庆华, 吴燕清, 宋劲, 等. 2014. 探地雷达在煤巷掘进中超前探测试验研究. 煤炭科学技术, 42(5): 91-94.

刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 2009. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究. 岩土力学, 30(10): 3093-3101, doi: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.10.035.

刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 2012. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测三维反演成像. 岩土工程学报, 34(10): 1866-1876.

刘斌, 李术才, 李建斌, 等. 2016. TBM 掘进前方不良地质与岩体参数的综合获取方法. 山东大学学报(工学版), 46(6): 105-112, doi: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2016.478.

刘金刚, 卢松, 李春林. 2021. 双模式 TBM 施工海底隧道 HSP 法地质预报案例分析. 现代隧道技术, 58(S1): 575-580, doi: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.S1.073.

刘继国, 崔庆龙, 李丹妮, 等. 2024. 截至 2023 年底中国 10 km 以上特长公路隧道统计与分析. 隧道建设(中英文), 44(1): 189-198, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.01.018.

柳建新,邓小康,郭荣文,等.2012.坑道直流聚焦超前探测电阻率法有限元数值模拟. 中国有色金属学报, 22(3):970-975, doi:10.19476/j.ysxb.1004.0609.2012.03.043.

刘黎东, 张富翔, 张继锋, 等. 2021. 基于等值反磁通的隧道 TEM 超前探测三维模拟及应用. 地球物理学进展, 36(6): 2730-2737, doi: 10.6038/pg2021FF0130.

刘青雯. 2001. 井下电法超前探测方法及其应用. 煤田地质与勘探, 29(5): 60-62, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2001.05.021.

卢松, 李苍松, 吴丰收, 等. 2017. HSP 法在引汉济渭 TBM 隧道地质预报中的应用. 隧道建设(中英文), 37(2): 236-241, doi: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.02.017.

卢松, 汪旭, 李苍松, 等. 2020. 应用 HSP 法的 TBM 隧道施工地质预报技术研究. 现代隧道技术, 57(3): 30-35, doi: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.03.005.

卢绪山. 2014. 隧道 TBM 机瞬变电磁响应三维并行模拟及干扰去除研究[硕士论文]. 西安: 长安大学, doi: 10.7666/d.D557172.

吕荣其. 2021. 矿用孔中瞬变电磁探测装置及特性研究[硕士论文]. 徐州: 中国矿业大学, doi: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001081.

苗彬, 姜志海, 刘树才. 2016. 矿井地面-巷道瞬变电磁探测系统设计及应用. 煤炭科学技术, 44(12): 148-153, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2016.12.026.

齐梦学. 2021. 我国 TBM 法隧道工程技术的发展、现状及展望. 隧道建设(中英文), 41(11): 1964-1979, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.11.011.

钱七虎. 2012. 地下工程建设安全面临的挑战与对策. 岩石力学与工程学报, 31(10): 1945-1956, doi: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.10.001.

钱七虎, 胡小强, 李树忱, 等. 2024. 中国盾构隧道工程关键技术的新进展综述. 隧道建设(中英文), 44(5): 897-926, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.05.001.

钱志远. 2023. 隧道超前地质预报的孔中雷达定向探测数据处理方法研究[硕士论文]. 山东大学, doi: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.003064.

强建科, 阮百尧, 周俊杰, 等. 2011. 煤矿巷道直流三极法超前探测的可行性. 地球物理学进展, 26(1): 320-326, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.038.

山东大学. 2015-11-25. 隧道掘进机破岩震源和主动源三维地震联合超前探测系统: 中国, 201510106445.2.

宋翱. 2017. 基于 TBM 类隧道的超前预报技术研究[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2017.000163.

宋翱. 2020. 基于隧道掌子面的三维地震智能超前地质预报探测技术研究[博士论文]. 北京: 中国地质大学(北京), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.001600.

宋杰. 2016. 隧道施工不良地质三维地震波超前探测方法及其工程应用[博士论文]. 济南: 山东大学.

孙怀凤, 李术才, 李貅, 等. 2011. 隧道瞬变电磁多点阵列式探测方法研究. 岩石力学与工程学报, 30(11): 2225-2233.

孙怀凤, 李貅, 卢绪山, 等. 2016. 隧道强干扰环境瞬变电磁响应规律与校正方法: 以 TBM 为例. 地球物理学报, 59(12): 4720-4732, doi: 10.6038/cjg20161231.

孙怀凤, 张莹莹, 赵友超, 等. 2022. 钻孔瞬变电磁法研究现状综述. 煤田地质与勘探, 50(7): 85-97, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2022.07.011.

同济大学, 浙江数智交院科技股份有限公司. 2025-05-30. 一种盾构刀盘一体化探地雷达天线装置: 中国, 202510188081.0.

王杜娟, 何飞, 王勇, 等. 2020. 煤矿岩巷全断面掘进机(TBM)及智能化关键技术. 煤炭学报, 45(6): 2031-2044, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.zn20.0206.

王路, 张恒, 吴建文. 2017. 强富水地层隧道含水构造精细预报技术研究. 铁道科学与工程学报, 14(12): 2660-2669, doi: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.12.020.

王其丁, 李文翰, 刘文韬, 等. 2024. TBM 隧道环境下的多源瞬变电磁成像方法研究. 地球物理学进展, 39(6): 2463-2470, doi: 10.6038/pg2024HH0478.

温世儒. 2015. 基于地质雷达的岩溶地区公路隧道超前探测技术研究[博士论文]. 西安: 长安大学, doi: 10.7666/d.D747572.

辛成涛, 程久龙, 李垚, 等. 2024. 钻孔瞬变电磁法接收线圈定向屏蔽物理模拟研究. 煤炭学报, 49(7): 3178-3187, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0798.

许新骥. 2017. TBM 掘进破岩震源地震波超前地质探测方法及工程应用[博士论文]. 济南: 山东大学, doi: 10.27272/d.cnki.gshdu.2017.000098.

薛国强, 李貅. 2008. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术. 地球物理学报, 51(3): 894-900.

严红, 吴林, 李桂臣, 等. 2025. 煤矿岩巷 TBM 快速掘进研究进展与展望. 煤炭工程, 57(1): 1-7, doi: 10.11799/ce202501001.

杨玲洁, 杨卓文, 王冬, 等. 2021. HSP 法超前地质预报技术在大凉山 1 号 TBM 施工隧道中的应用. 工程地球物理学报, 18(5): 647-654, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2021.05.014.

叶琛. 2006. 探地雷达应用于盾构前方地质和障碍物探测研究[硕士论文]. 上海: 同济大学, doi: 10.7666/d.y844847.

袁亮, 张平松. 2023. TBM 施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考. 煤田地质与勘探, 51(1): 21-32, doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.12.0967.

岳建华, 滕小振, 习丹阳, 等. 2025. 矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置模拟及其应用. 煤炭学报, 50(1): 564-571, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0943.

曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 2006. 探地雷达方法原理及应用. 北京: 科学出版社.

张安学, 蒋延生, 汪文秉. 2002. 圆周探地雷达测量和成像方法的研究. 电子学报, 30(6): 853-856, doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2002.06.022.

张崇民, 张凤凯, 李尧. 2019. 隧道施工不良地质探地雷达超前探测全波形反演研究. 隧道建设(中英文), 39(1): 102-109, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.01.013.

张凤凯. 2020. TBM 破岩震源探测数据的全波形反演和逆时偏移成像方法[博士论文]. 济南: 山东大学.

张洪伟, 胡兆锋, 程敬义, 等. 2021. 深部高温矿井大断面岩巷 TBM 智能掘进技术——以"新矿 1 号"TBM 为例. 煤炭学报, 46(7):

2174-2185, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.JJ21.0579.

张军. 2020. 钻孔瞬变电磁响应规律与水体定位研究[硕士论文]. 济南: 山东大学.

张平松, 李圣林, 邱实, 等. 2021. 巷道快速智能掘进超前探测技术与发展. 煤炭学报, 46(7): 2158-2173, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.JJ21.0562.

张盛, 陈召, 卢松, 等. 2024. HSP 超前探测技术在煤矿 TBM 掘进巷道中的应用研究. 煤田地质与勘探, 52(3): 107-117, doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.07.0451.

赵子越, 游元明, 孟露, 等. 2021. HSP 法在盾构施工隧道超前地质预报中的改进和应用. 隧道建设(中英文), 41(8): 1344-1352, doi: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.08.010.

周奇才, 崔涛, 何自强, 等. 2006. 盾构施工中地质情况超前预报的雷达探测研究. 中国工程机械学报, 4(3): 331-334.

周奇才, 何宏宇, 李婧, 等. 2007. 盾构施工前方的探地雷达探测模拟试验. 中国工程机械学报, 5(2): 210-214, doi: 10.3969/j.issn.1672-5581.2007.02.018.

周奇才, 冯双昌, 李炳杰, 等. 2009. 不良地质的探地雷达图像模拟与识别. 地下空间与工程学报, 5(6): 1110-1114, doi: 10.3969/j.issn.1673-0836.2009.06.009.

周奇才, 陈秋锋, 江胜男, 等. 2010a. 探地雷达在盾构前向探测应用中工作参数的选择. 中国工程机械学报, 8(3): 353-357, doi: 10.3969/j.issn.1672-5581.2010.03.021.

周奇才, 冯双昌, 陈海燕, 等. 2010b. 盾构施工前向地质探测雷达保护板的设计. 机械设计, 27(1): 68-70, doi: 10.13841/j.cnki.jxsj.2010.01.016.

朱劲, 李天斌, 李永林, 等. 2007. Beam 超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用. 工程地质学报, 15(2): 258-262.

朱仲. 2017. ISP 系统在 TBM 隧道超前地质预报中的应用研究[硕士论文]. 成都: 成都理工大学.